



Fraunhofer
IAF

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE FESTKÖRPERPHYSIK IAF

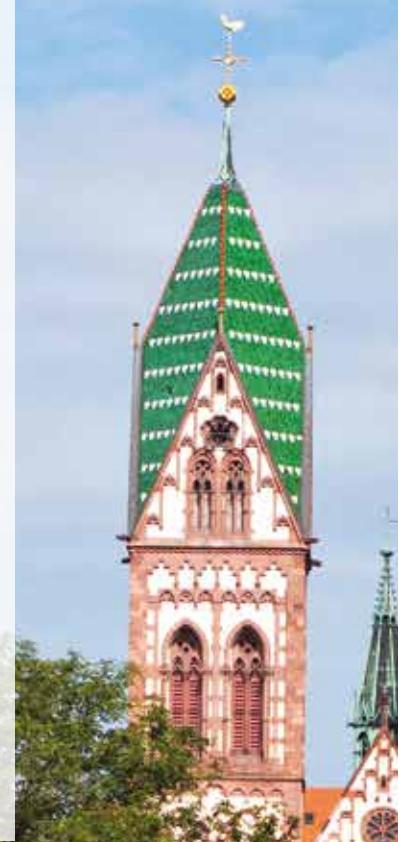


**ANNUAL REPORT
JAHRESBERICHT
2015/2016**

BUILDING BRIDGES

How can we bridge the »valley of death«? Our answer is the applied research of Fraunhofer, which bridges the gap between basic research and finished products. Together with our many different partners – universities, small and medium-sized enterprises, corporations, and representatives from politics – we continuously build new small and large bridges for successful technology transfer. So that innovations and applications emerge which are useful for all of us.

Wie können wir das »Valley of Death« überbrücken? Unsere Antwort ist die angewandte Forschung durch Fraunhofer. Sie steht für den Brückenschlag zwischen der Grundlagenforschung und dem fertigen Produkt. Gemeinsam mit unseren vielfältigen Partnern, von Universitäten über den Mittelstand bis hin zu multinationalen Großunternehmen und der Politik, gelingt es dem Fraunhofer IAF immer wieder, kleine und große Brücken für den erfolgreichen Technologietransfer zu bauen. Damit Innovationen und Anwendungen entstehen, die uns allen nutzen.



Wiwili Bridge, Freiburg.
Wiwili-Brücke, Freiburg.



**ANNUAL REPORT
JAHRESBERICHT
2015/2016**

PREFACE

VORWORT

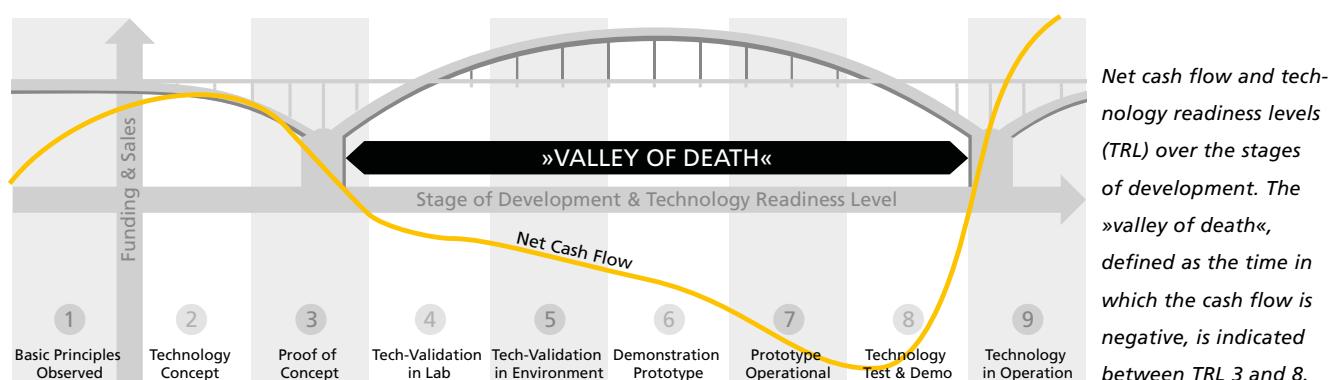
BUILDING BRIDGES CROSSING THE »VALLEY OF DEATH«

Whilst European research and development (R&D) is generally strong in new technologies, the transition from ideas arising from basic research to competitive production is the weakest link in R&D enabled value chains. The gap between basic knowledge generation and the subsequent commercialization of this knowledge in marketable products is known as the »valley of death«. It has been identified by the high-level expert group on key enabling technologies as well as by the Fraunhofer-Gesellschaft in engineering disciplines. As a consequence of this awareness, Fraunhofer has established coordinated programs in strategically important areas that cover the full innovation chain addressing applied research, demonstrators, standardization measures, deployment and market access in a logical joined-up manner. All technology readiness levels (TRL, Fig.1) are being addressed, from basic knowledge, proof-of-concept to prototypes as well as industrial manufacturing.

Bridging the »valley of death« in compound semiconductor related technologies is the mission of Fraunhofer IAF. It requires the delivery of solutions to the three successive stages implicit in building the bridge to cross the »valley of death«. The first stage, called »technological research« consists of taking best advantage of scientific excellence in transforming the ideas arising from fundamental research into technologies competitive at world level. Representative examples of every business unit of the institute related to this stage can be found in the chapter entitled »Business Units – Bridging the Gap«. In the second stage, called »system demonstration«, prototypes

and demonstrators are built using enabling technologies tested in the lab. This enables pilot lines for the processing of a significant quantity of innovative prototypes which can then be tested and validated by the customer. Fraunhofer IAF together with its partners of world leading scientific institutions as well as from industry has succeeded in various demonstrations of prototypes and technologies described in the chapter »Building Bridges - Success Stories«. The third stage, called »competitive manufacturing« is mainly driven by industry and allows to create and to maintain attractive economic environments. In this stage we aim to successfully transfer products into marketable products together with our partners in order to face international competition and master solutions to tackle grand societal challenges. Which technologies and »key products« the strategy of Fraunhofer has developed in order to ease the way of industry towards competitive manufacturing is shown in the chapter »Supporting Bridge Piers«.

»Building Bridges« is the motto of the annual report 2015/2016, visualizing how Fraunhofer IAF transfers ideas into technologies, prototypes, and innovations. The close collaboration with universities and industry has enabled our business units to push III-V semiconductor concepts towards higher TRLs and higher added value. We are always looking for the next stone and pillar which contributes to building a bridge with and to our partners. We hope you will enjoy reading the annual report and you are most welcome to become part or customer of our »construction team«.





Während die europäische Forschung und Entwicklung in der Regel stark darin ist, neue Technologien zu erforschen, ist der Übergang von Ideen aus der Grundlagenforschung zu wettbewerbsfähiger Produktion das schwächste Glied in der Wertschöpfungskette. Die Lücke zwischen der Generierung von Grundlagenwissen und dessen anschließender Überführung in marktfähige Produkte ist als das »Valley of Death« bekannt. Dieses »Tal des Todes« der Natur- und Ingenieurwissenschaften wurde sowohl von der europäischen Expertengruppe für Spitzentechnologien als auch von der Fraunhofer-Gesellschaft erkannt. Als Folge hat Fraunhofer Programme in strategisch wichtigen Bereichen etabliert, die die gesamte Innovationskette der angewandten Forschung über Demonstratoren, Standardisierungsmaßnahmen bis hin zur Markteinführung in logisch aufeinander aufbauenden Stufen abdecken. Dabei werden alle Technology Readiness Levels (TRL, Abb. 1) von der Grundlagenforschung über den Nachweis des Konzepts bis hin zu Prototypen und der industriellen Fertigung adressiert.

Das Fraunhofer IAF möchte mit seiner Forschung und Entwicklung dazu beitragen, das »Valley of Death« der Verbindungshalbleiter-Technologien zu überbrücken. Dazu arbeiten wir an drei Säulen, die unsere Brücke über das »Valley of Death« stützen. Die erste Säule, die sogenannte »Technologie-Forschung« schafft die Voraussetzungen, um wissenschaftliche Exzellenz in international wettbewerbsfähige Technologien zu überführen. Repräsentative Beispiele unserer Technologien für die erste Säule finden Sie im Kapitel »Business Units – Bridging the Gap«. Die zweite Säule bildet die »System-Demonstration«. Unter Verwendung der im Labor getesteten Technologien werden Prototypen und Demonstratoren realisiert. Darauf aufbauend können Pilotlinien zur Prozessierung von Kleinserien geschaffen werden, die eine Demonstration und Testung der entwickelten Fertigung sowie die Validierung der Prototypen durch den Kunden erlauben. Im Kapitel »Building Bridges – Success Stories« zeigen wir Ihnen, wie das Fraunhofer IAF in Kooperation mit führenden wissenschaftlichen Einrichtungen und namhaften Industrieunternehmen eine hohe Anzahl von Technologien und Demonstratoren realisieren konnte. Die dritte Säule »Wettbewerbsfähige Fertigung« wird stark durch die Industrie mitgetragen, um langfristig ein attraktives wirtschaftliches Umfeld sichern zu können. Gemeinsam mit unseren Partnern geht es in diesem Stadium darum, die Prototypen erfolgreich in marktfähige Produkte zu überführen, im internationalen Wettbewerb zu bestehen, und Lösungen für die gesellschaftlichen Herausforderungen von morgen zu finden. Lesen Sie im Kapitel »Supporting Bridge Piers«, welche Technologien und »Key Products« das Fraunhofer IAF entwickeln konnte, um gemeinsam mit Unternehmen den Weg für die »wettbewerbsfähige Fertigung« zu ebnen.

Der Jahresbericht 2015/2016 zeigt unter dem Motto »Building Bridges«, wie Ideen in Technologien, Prototypen und Innovationen überführt werden. Die enge Kooperation mit Universitäten und Unternehmen hat es unseren Geschäftsfeldern ermöglicht, Konzepte auf der Basis von Verbindungshalbleitern in Richtung höherer Technology Readiness Levels und Wertschöpfung zu transferieren. Auch 2016 halten wir weiter Ausschau nach dem nächsten Stein und Pfeiler, der dazu beiträgt, eine Brücke mit und zu unseren Partnern zu bauen. Ich wünsche Ihnen eine informative Lektüre unseres Jahresberichts und lade Sie herzlich dazu ein, Mitwirkender oder Kunde unseres »Konstruktionsteams« zu werden.

Oliver von Bechtolsheim

TABLE OF CONTENTS

INHALTSVERZEICHNIS

BUILDING BRIDGES

2	Preface Vorwort
6	Advisory Board Kuratorium
8	Success Stories Erfolgreiche Brückenschläge
22	Services Dienstleistungen

BUSINESS UNITS – BRIDGING THE GAP

28	High Frequency Electronics Hochfrequenzelektronik
44	Power Electronics Leistungselektronik
60	Photodetectors Photodetektoren
76	Semiconductor Lasers Halbleiterlaser
92	Semiconductor Sensors Halbleitersensoren

SUPPORTING BRIDGE PIERS

- 110** **Institute in Figures**
Institut in Zahlen
- 112** **Strategy 2016+**
Strategie 2016+
- 114** **New Organizational Structure 2016**
Neue Organisationsstruktur 2016
- 116** **Key Products**
Schlüsselprodukte
- 118** **Award Winning Gallium Nitride:
Karl Heinz Beckurts Award**
Ausgezeichnetes Galliumnitrid:
Karl Heinz Beckurts-Preis
- 120** **New Equipment for Excellent Research**
Neue Anlagen für exzellente Forschung
- 124** **Fairs and Events 2015**
Messen und Veranstaltungen 2015
- 128** **Appendix**
Anhang



Das Kuratorium, ein Expertengremium mit Vertretern aus Industrie, Forschung und Politik, begleitet die Forschungsarbeiten des Fraunhofer IAF und berät den Institutsleiter sowie den Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft.

Prof. Dr. Jürg Leuthold

ETH Zürich

Dr. Conrad Reynvaan

Hoffmann & Co. Elektrokohle AG, Bad Goisern

BDir Wolfgang Scheidler

European Defence Agency (EDA), Bruxelles

Dr. Dietmar Schill

Sony Deutschland GmbH, Stuttgart

Dr. Arno Simon

Bruker Optik GmbH, Ettlingen

Dr. Klaus Streubel

OSRAM GmbH, Augsburg

MinR Norbert Weber

Bundesministerium der Verteidigung (BMVg), Bonn

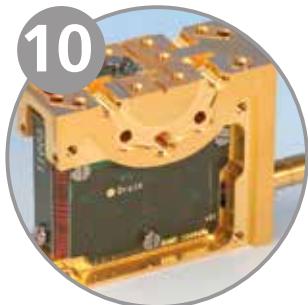
Prof. Dr. Werner Wiesbeck

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

SUCCESS STORIES

ERFOLGREICHE BRÜCKENSCHLÄGE

10



BRIDGING THE GAP TO PRECISE WEATHER FORECASTS

BRÜCKENSCHLAG FÜR PRÄZISE WETTERVORHERSAGEN

For the satellite-based earth observation of the European Space Agency (ESA), Fraunhofer IAF is developing low-noise microwave amplifiers covering a frequency band from 54 to 243 GHz. These play a key role in the precision of the weather forecast.

Für die Satelliten-gestützte Erdbeobachtung der European Space Agency (ESA) entwickelt das Fraunhofer IAF rauscharme Mikrowellenverstärker im Frequenzbereich von 54 bis 243 GHz. Diese spielen eine entscheidende Rolle für die Genauigkeit der Wettervorhersage.

BRIDGING THE GAP TO BETTER PRODUCT QUALITY

BRÜCKENSCHLAG FÜR BESSERE PRODUKTQUALITÄT

Together with other Fraunhofer Institutes researchers of Fraunhofer IAF are developing fast spectral tunable quantum cascade lasers used in mobile sensor systems for inline-process control and the detection of hazardous substances.

Im Verbund mit anderen Fraunhofer-Instituten entwickeln Forscher des Fraunhofer IAF schnell durchstimmbare Quanten-kaskadenlaser für mobile Messsysteme in der Inline-Prozess-kontrolle und die Detektion von Gefahrstoffen.

12



BRIDGING THE GAP TO GEMS

BRÜCKENSCHLAG ZU SCHMUCKDIAMANTEN

For the growing of ultrapure man-made diamond, Fraunhofer IAF is working on a technique, enabling the start-up company coat6 to produce millimeter-sized gemstones.

14

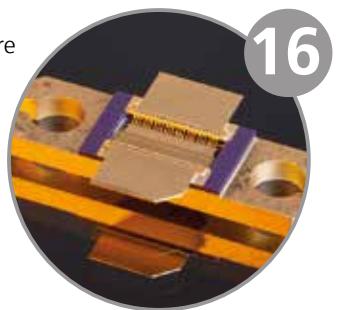


Für die Herstellung hochreiner synthetischer Diamanten arbeitet das Fraunhofer IAF an einem Verfahren, das dem Start-up coat6 die Herstellung von einigen Millimeter großen Schmuck-diamanten erlaubt.

BRIDGING THE GAP FOR DATA RATES UP TO 1 Gbit/s **BRÜCKENSCHLAG FÜR DATENRATEN BIS ZU 1 Gbit/s**

For the mobile communication needs of tomorrow, Fraunhofer IAF and Nokia are developing gallium nitride amplifiers. These will meet the challenges of the strong data rate growth in 5G mobile communication.

Für die Anforderungen des Mobilfunks von morgen entwickelt das Fraunhofer IAF gemeinsam mit Nokia Galliumnitrid-Verstärker, die den stark steigenden Datenraten der 5G-Kommunikation gewachsen sind.



BRIDGING THE GAP FOR HIGHLY SENSITIVE SENSOR SYSTEMS **BRÜCKENSCHLAG FÜR HOCHEMPFINDLICHE SENSORSYSTEME**

In a cooperation between Fraunhofer IAF and the Baden-Wuerttemberg Cooperative State University (DHBW) Lörrach radar and laser systems for the monitoring and control of production lines will be developed together with industry partners.

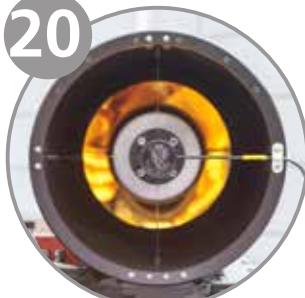
In einer Kooperation zwischen Fraunhofer IAF und der Dualen Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Lörrach sollen gemeinsam mit Industriepartnern Radar- und Lasersysteme für die Kontrolle und Steuerung von Produktionsstrecken realisiert werden.



BRIDGING THE GAP FOR MORE SECURITY **BRÜCKENSCHLAG FÜR MEHR SICHERHEIT**

For the contactless detection of explosives, a European consortium including Fraunhofer IAF developed a special laser technology, which helps to investigate the site of crime without entering the scene.

Für die berührungslose Sprengstoffdetektion entwickelt das Fraunhofer IAF im Rahmen eines europäischen Projekts Lasersysteme, die Einsatzkräften eine Untersuchung des Tatorts ermöglichen, ohne diesen zu betreten.



BRIDGING THE GAP TO PRECISE WEATHER FORECASTS

BRÜCKENSCHLAG FÜR PRÄZISE WETTERVORHERSAGEN



»The semiconductor indium gallium arsenide is ideally suited for the extremely low-noise and powerful high frequency amplifiers of the MetOp project.«

Dr. Michael Schlechtweg, Fraunhofer IAF

»Der Halbleiter Indium-Gallium-Arsenid eignet sich ideal für die extrem rauscharmen und leistungsfähigen Hochfrequenzverstärker des MetOp-Projekts.«



Pont Alexandre III, Paris
Pont Alexandre III, Paris



Satellite-based earth observation in cooperation with ESA

Having reliable meteorological data is a key requirement for accurate weather forecasts. The »MetOp Second Generation« project of the European Space Agency (ESA) addresses this point: Starting from 2021, earth observation satellites will investigate the worldwide climate from 800 km altitude using millimeter waves that penetrate through clouds. Fraunhofer IAF has developed a family of low-noise monolithic microwave amplifiers covering a frequency band from 54 to 243 GHz and has already been able to successfully supply the project partners with the first devices. Low-noise amplifiers are the first components of the instruments' receiver chains, and they will largely define the noise performance of the complete receivers. Receiver noise performance on the other hand plays a key role for the precision of the weather forecast instruments.

Satellitengestützte Erdbeobachtung in Kooperation mit der ESA

Verlässliche meteorologische Daten sind eine essenzielle Voraussetzung für präzise Wettervorhersagen. Hier setzt das Projekt »MetOp Second Generation« der European Space Agency (ESA) an: Moderne Erdbeobachtungssatelliten sollen bis 2021 aus 800 km Höhe das Klima weltweit erforschen – mit Hilfe von wolkendurchdringenden Millimeterwellen. Das Fraunhofer IAF hat hierfür rauscharme monolithische Mikrowellenverstärker im Frequenzbereich von 54 bis 243 GHz entwickelt und konnte die ersten Bauelemente bereits erfolgreich an die Projektpartner ausliefern. Die rauscharmen Verstärker sind das erste und wichtigste Glied in der Kette der Empfängerinstrumente. Ihre Performance definiert in hohem Maße das Rauschverhalten der Empfänger, welches wiederum eine entscheidende Rolle für die Genauigkeit der Wettervorhersage spielt.

»Thanks to the Fraunhofer IAF microwave circuits, the MetOp satellites will be able to measure temperature, water vapor, and precipitation with higher precision in the future. This will in turn improve the weather forecast capability.«

Ville Kangas, European Space Agency

»Dank der Mikrowellenschaltungen des Fraunhofer IAF können die MetOp-Satelliten künftig Temperatur, Wasserdampf und Niederschlagsart noch präziser ermitteln. Dies erhöht die Zuverlässigkeit der Wettervorhersage.«



BRIDGING THE GAP TO BETTER PRODUCT QUALITY

BRÜCKENSCHLAG FÜR BESSERE PRODUKTQUALITÄT



»Thanks to our novel external cavity quantum cascade lasers we are able to detect small amounts of chemical substances in spectroscopic measurements. That way we can replace lavish laboratory tests and guarantee a continuous process control.«

Dr. Ralf Ostendorf, Fraunhofer IAF

»Dank unseres neuartigen Quantenkaskadenlasers können wir in spektroskopischen Messungen kleinste stoffliche Mengen schnell und präzise erkennen. Damit ist es möglich, aufwendige Labormessungen zu ersetzen und eine kontinuierliche Prozess-überwachung zu gewährleisten.«



Loschwitzer Bridge – Blaues Wunder, Dresden.
Loschwitzer Brücke – Blaues Wunder, Dresden.



Cooperation with Fraunhofer IPMS for laser-based measuring systems

To secure a high quality of food or pharma products, production processes need to be continuously monitored. For this purpose, Fraunhofer IAF, together with other Fraunhofer Institutes, is developing a sensor system based on an external cavity quantum cascade laser (QCL): Through the combination of the spectral tunable QCL with micromechanical optical grating, it is possible to scan a broad wavelength range, analyze specific absorption bands, and hence detect chemical substances within milliseconds. This »finger print« technique allows compact sensor systems for inline-process control or for the fast detection of hazardous substances in liquids or on surfaces.

Kooperation mit dem Fraunhofer IPMS für laserbasierte Messsysteme

Um eine hohe Qualität von Lebensmitteln oder Pharmaprodukten sicherstellen zu können, müssen Produktionsprozesse kontinuierlich überwacht werden. Hierfür entwickelt das Fraunhofer IAF im Verbund mit weiteren Fraunhofer-Instituten ein Messsystem basierend auf einem Quantenkaskadenlaser im externen Resonator (QCL): Dank der Kombination von spektral durchstimmbaren QCLs mit optischen Mikroglittern als wellenlängenselektives Element, kann in wenigen Millisekunden ein breites Wellenlängen-Spektrum vermessen, spezifische Absorptionsbanden analysiert und chemische Substanzen identifiziert werden. Dieses »finger print«-Verfahren ermöglicht mobile Messsysteme für Inline-Prozesskontrollen, sowie für die schnelle Detektion von Gefahrstoffen in Flüssigkeiten oder auf Oberflächen.

»By integrating our micromechanical scanning grating in the external cavity of the QCL developed at Fraunhofer IAF, we can now measure 2000 spectra per second, increasing the performance of previous measuring systems by a factor of 20.«

Dr. Jan Grahmann, Fraunhofer IPMS

»Durch die Integration unseres mikromechanischen Gitterspiegels in den externen Resonator des QCLs vom Fraunhofer IAF ist es nun möglich, 2000 Spektren pro Sekunde zu messen. Damit konnten wir die Leistung bisheriger Messsysteme um den Faktor 20 steigern.«



BRIDGING THE GAP TO GEMS BRÜCKENSCHLAG ZU SCHMUCKDIAMANTEN



»The combination of our expertise in the diamond production with the experience we have gained in plant construction offers new attractive technology approaches for industry partners.«

Dr. Christoph Nebel, Fraunhofer IAF

»Unsere Expertise in der Diamantherstellung kombiniert mit den gewonnenen Erfahrungen im Anlagenbau ermöglicht neue attraktive Technologieansätze für Industriepartner.«



Bridge at the Eisbach, Munich
Brücke am Eisbach, München



Growing diamonds in a plasma in cooperation with coat6

So far, synthetic diamond is primarily used in industrial applications such as material processing, e. g. by drilling machines. The technology Fraunhofer IAF has now brought to maturity enables the simultaneous growth of ultrapure monocrystalline diamonds within a microwave-induced plasma. This technique is particularly interesting for the jewelry industry: By introducing foreign atoms, the diamond will obtain the shade of color that is desired for the gemstone. The diamond reactor will be optimized for the start-up company coat6 in order to enable the production of millimeter-sized gemstones within a few weeks. This way, the IAF combines its skills in the growing of diamonds with its expertise in reactor engineering. The resulting technology approach is very attractive for the jewelry industry.

Diamantwachstum im Plasma in Zusammenarbeit mit coat6

Bisher kommt synthetischer Diamant primär in industriellen Anwendungen wie der Materialbearbeitung, z. B. durch Bohrmaschinen, zum Einsatz. Das Fraunhofer IAF hat jetzt eine Technologie entwickelt, mit der in einem mikrowelleninduzierten Plasma viele hochreine, einkristalline Diamanten gleichzeitig gewachsen werden können. Das Verfahren ist besonders für die Schmuckindustrie interessant: Denn durch das Einbringen von Fremdatomen erhält der Diamant den für den Schmuckstein gewünschten Farbton. Für das Startup-Unternehmen coat6 bündelte das Fraunhofer IAF seine Kompetenz im Diamantwachstum mit seiner Expertise im Reaktorbau und optimierte den Diamantreaktor soweit, dass in nur wenigen Wochen Schmuckdiamanten mit Abmessungen von einigen Millimetern entstehen.

»The optimized reactor of the Fraunhofer IAF enables us to enter new markets for the production of man-made diamond gemstones.«

Ralf Eichert, coat6

»Mit dem vom Fraunhofer IAF optimierten Reaktor erschließen wir neue Märkte für die industrielle Produktion synthetischer Schmuckdiamanten.«



BRIDGING THE GAP FOR DATA RATES UP TO 1 Gbit/s

BRÜCKENSCHLAG FÜR DATENRATEN BIS ZU 1 Gbit/s



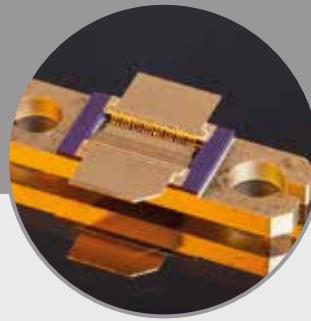
»The challenge for the new amplifiers lies in the strong growth of the data rates. Amplifiers based on silicon are reaching their limits. This is why we are developing GaN-based amplifiers for 5G mobile communication that provide high efficiency over a large bandwidth.«

Fabian Thome, Fraunhofer IAF

»Die Herausforderung für die neuen Verstärker liegt in den stark wachsenden Datenraten. Verstärker aus Silizium kommen an ihre Grenzen. Daher realisieren wir für die 5G-Mobilkommunikation hocheffiziente GaN-Verstärker, die eine hohe Bandbreite aufweisen.«



Light railway bridge in Ostfildern, Stuttgart.
Stadtahnbrücke in Ostfildern, Stuttgart.



Shaping the 5th generation of mobile communication with Nokia

Along with our partners we will bridge the gap in mobile communication to reach data rates of up to 1 Gbit/s for cellphone users. While the beginning of the development was defined by data rates of kilobit/s and simple data communication via SMS, we are facing a strong growth in data rates. Thanks to a long-term cooperation with Nokia, the networks will be able to support the sending of videos for advanced smartphones in 2020 with an extremely low delay (latency). This short latency is a precondition for future applications in Industry 4.0, as it facilitates the direct communication between machines. In the EU project Flex5Gware we are cooperating with Nokia, Intel and Ericsson, to develop base station amplifiers covering the communication bands of 400 MHz up to at least 6 GHz.

Mit Nokia die 5. Generation des Mobilfunks gestalten

Mit unseren Partnern werden wir die Lücken im Mobilfunk überbrücken, um Datenraten von 1 Gbit/s für Handynutzer zu ermöglichen. Standen am Anfang der Entwicklung noch Datenraten von Kilobit/s und die einfache Datenkommunikation per SMS, sehen wir uns heute stark wachsenden Datenraten gegenüber. In langjähriger Zusammenarbeit mit Nokia werden die Netzwerke im Jahr 2020 das Versenden von Videos in neuen Smartphones unterstützen, und das mit einer extrem geringen Verzögerung (Latenz). Diese kurze Latenzzeit ist zudem Voraussetzung für kommende Anwendungen im Bereich Industrie 4.0, da sie die direkte Maschinenkommunikation ermöglicht. Im EU-Projekt Flex5Gware entstehen dafür gemeinsam mit Nokia, Intel und Ericsson Verstärker für Basisstationen, welche die Kommunikationsbänder von 400 MHz bis mindestens 6 GHz abdecken.

»The use of GaN technology in new amplifier concepts will enable a significant reduction in CO₂ generation and simplify the systems, while the data rates continue to grow exponentially to the benefit of the user.«

Dieter Ferling, Nokia



»Die Verwendung von GaN-Verstärkern für 5G in neuen Verstärkerkonzepten wird eine signifikante Reduktion des CO₂-Ausstoßes bringen, und die Systeme vereinfachen, während die Datenraten zum Nutzen der Anwender weiter exponentiell wachsen.«

BRIDGING THE GAP FOR HIGHLY SENSITIVE SENSOR SYSTEMS BRÜCKENSCHLAG FÜR HOCHEMPFINDLICHE SENSORSYSTEME



»We want to build bridges between high technology and industrial applications and this way contribute to the realization of Industry 4.0.«

Prof. Dr. Frauke Steinhagen, Fraunhofer IAF

»Wir wollen zwischen Hochtechnologie und industrieller Anwendung Brücken bauen und so zur Realisierung der Vision von Industrie 4.0 beitragen.«



Dreiländer Bridge, Weil am Rhein.
Dreiländerbrücke, Weil am Rhein.



Cooperation with DHBW Lörrach promotes Industry 4.0 in the region

The realization of Industry 4.0 concepts requires improved sensors. Therefore, Fraunhofer IAF, the Baden-Wuerttemberg Cooperative State University (DHBW) Lörrach, and industry partners cooperate on the development of radar and laser sensors for the monitoring, security, and control of production lines. The cooperation especially aims at addressing small and medium-sized companies in the region. Students at DHBW Lörrach can also profit from the bridge between teaching and research: They can exchange ideas with scientists from Fraunhofer IAF and are able to participate in research projects.

Kooperation mit der DHBW Lörrach fördert Industrie 4.0 in der Region

Die Realisierung von Industrie 4.0-Konzepten erfordert verbesserte Sensoren. Deshalb arbeiten das Fraunhofer IAF und die Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Lörrach gemeinsam mit Industriepartnern an neuartigen Radar- und Lasersensoren für die Kontrolle, Sicherung und Steuerung von Produktionsstrecken. Im Rahmen der Zusammenarbeit sollen besonders kleine und mittlere Unternehmen in der Region angesprochen werden. Auch die Studierenden der DHBW Lörrach profitieren von der Brücke zwischen Lehre und Forschung: Sie haben die Möglichkeit, sich mit Wissenschaftlern vom Fraunhofer IAF auszutauschen und selbst an Forschungsprojekten mitzuarbeiten.

»I am very happy about our cooperation. It is a milestone for the DHBW Lörrach – especially since Oliver Ambacher and I have been working on building this bridge for years.«

Prof. Dr. Jörg Thietke, DHBW Lörrach

»Ich freue mich sehr über unsere Kooperation. Sie ist ein Meilenstein für die DHBW in Lörrach – zumal Oliver Ambacher und ich schon seit Jahren am Bau dieser Brücke arbeiten.«



BRIDGING THE GAP FOR MORE SECURITY BRÜCKENSCHLAG FÜR MEHR SICHERHEIT



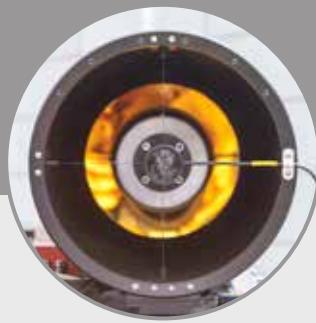
»Our quantum cascade lasers enable a reliable investigation of the site of crime – without entering the scene.«

Dr. Frank Fuchs, Fraunhofer IAF

»Unsere Quantenkaskadenlaser ermöglichen eine zuverlässige kriminalistische Untersuchung des Tatorts – ohne die Szene zu betreten.«



Øresund Bridge, Sweden / Denmark.
Øresundbrücke, Schweden / Dänemark.



EU cooperation for detecting explosives through laser technology

Explosives pose extreme challenges to rescue forces. In order to protect the people on site, the scene needs to be secured immediately. Only then the criminal case can be investigated. This is where the innovative sensor technology of Fraunhofer IAF comes into operation: Thanks to a special quantum cascade laser, the relief units are able to identify the used explosives with absolute certainty – without entering the scene. They can also detect possible further explosive devices. During a field test in Sweden on the test side of the Swedish Defence Research Agency (FOI), the effectiveness of the new system was successfully demonstrated.

EU-Kooperation zur Sprengstoffdetektion mit Lasertechnologie

Sprengstoffe sind eine extreme Herausforderung für Rettungskräfte. Um die Menschen vor Ort zu schützen, müssen sie den Tatort sofort sichern. Erst danach kann die kriminalistische Arbeit beginnen. Hier kommt die innovative Sensortechnologie des Fraunhofer IAF zum Einsatz: Mit Hilfe eines speziellen Quantenkaskadenlasers können die Einsatzkräfte den verwendeten Sprengstoff zweifelsfrei identifizieren – ohne die Szene zu betreten. Zudem können mögliche weitere Sprengsätze aufgespürt werden. In einem Feldtest in Schweden konnte auf dem Übungsgelände der Swedish Defence Research Agency (FOI) die Leistungsfähigkeit des neuen Systems erfolgreich unter Beweis gestellt werden.

»With the laser technology of the Fraunhofer IAF, crime scenes of terrorist attacks can be secured and first forensic results are obtained very rapidly.«

Dr. Hans Önnerud, FOI Sweden

»Mit der Lasertechnologie des Fraunhofer IAF können bei Terroranschlägen der Tatort gesichert und erste forensische Ergebnisse schnell erzielt werden.«



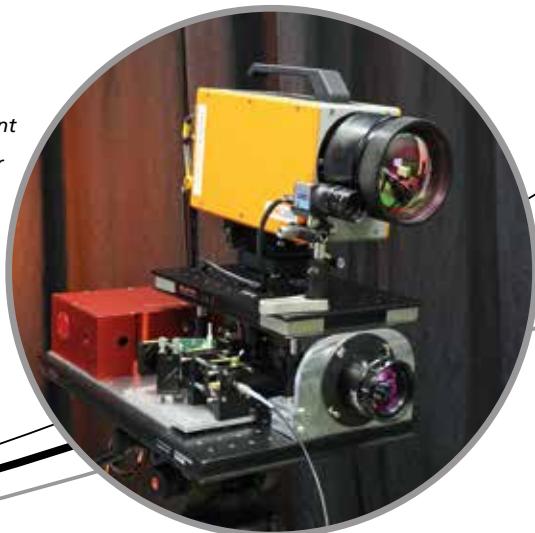
SERVICES

DIENSTLEISTUNGEN

Fraunhofer IAF offers a wide range of measurement techniques and services. These cover the chemical and structural analysis of III-V semiconductor materials and epitaxial layers, high-frequency measurement facilities, as well as an application laboratory for laser-based infrared spectroscopy. These capabilities are in many aspects unique. In the high frequency field we are, for example, able to measure S-parameters up to a frequency of 1.1 THz.

Das Fraunhofer IAF bietet seinen Kunden eine breite Palette an Messtechniken als Serviceleistung an. Diese reicht von der strukturellen und chemischen Analyse von III/V-Halbleitermaterialen und Epitaxieschichten bis hin zu Hochfrequenz-Messsystemen und einem Applikationslabor für Laser-basierte Infrarot-Spektroskopie. So können z. B. im Bereich der Hochfrequenzmesstechnik S-Parameter-Messungen bis zu Frequenzen von 1,1 THz durchgeführt werden.

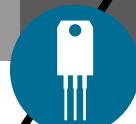
Infrared standoff detection measurement set-up available in our application lab.
Messaufbau für Infrarot-Ferndetektion, der in unserem Applikationslabor zur Verfügung steht.



Optical Analysis
Optische Analytik



Structural Analysis
Strukturelle Analytik



Electrical Characterization Elektrische Charakterisierung

Application lab for laser-based analytical infrared spectroscopy

Fraunhofer IAF operates an application lab featuring its external cavity quantum cascade laser (EC-QCL) technology in a range of spectroscopic applications. The following measurement setups are available at present; other configurations can be realized on request.

- EC-QCL as a spectroscopic light source for the 3.7 to 11.5 μ m wavelength range
- EC-QCL-based spectrometer for transmission measurements on liquid samples; including a continuous flow measurement cell
- Set-up for EC-QCL-based imaging IR laser backscattering spectroscopy which allows the non-contact determination of the chemical composition of solids, in particular the chemically sensitive detection of surface contaminations
- Customized data acquisition and analysis software

Applikationslabor für Infrarot-Laser-basierte spektroskopische Analytik

Das Fraunhofer IAF verfügt über ein Applikationslabor, in dem wir unsere Quantenkaskadenlaser mit externem Resonator (EC-QCL) in spektroskopischen Anwendungen demonstrieren. Die folgenden Messaufbauten stehen zur Verfügung; weitere Messkonfigurationen können auf Wunsch realisiert werden.

- EC-QCL als spektroskopische Lichtquelle für den Wellenlängenbereich 3,7 bis 11,5 μ m
- EC-QCL-basierendes Spektrometer für Transmissionsmessungen an Flüssigkeiten; inkl. Durchflussmesszelle
- Messaufbau zur EC-QCL-basierten abbildenden IR-Laser-Rückstreupektristik für die berührungslose Bestimmung chemischer Zusammensetzungen von Feststoffen und der chemisch sensitiven Detektion von Oberflächenkontaminationen
- Anwendungsspezifische Datenerfassungs- und Auswertesoftware

Contact: Jan-Philip Jarvis
jan-philip.jarvis@iaf.fraunhofer.de

High frequency measurement facilities

Fraunhofer IAF features a variety of advanced measurement systems for the characterization of integrated circuits and high frequency modules; e. g. low-noise and power amplifiers, mixers, frequency multipliers, oscillators, switches, and phase shifters. The following measurement facilities are available:

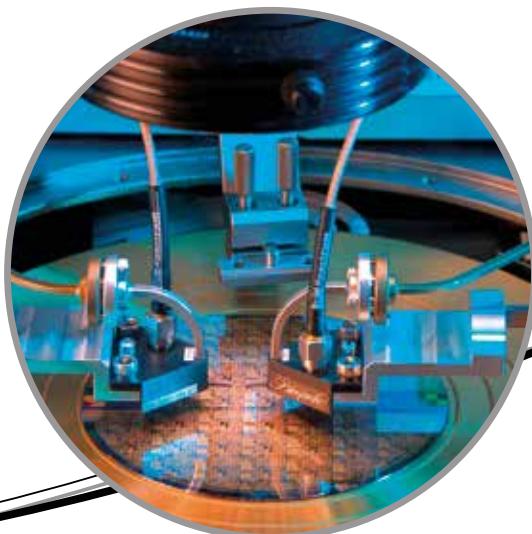
- S-parameters up to 1.1 THz
- Load-pull up to 110 GHz
- Noise parameters up to 50 GHz
- Noise figure up to 750 GHz
- Power up to 300 GHz
- Intermodulation up to 50 GHz

Contact: Hermann Massler
hermann.massler@iaf.fraunhofer.de

Hochfrequenz-Messsysteme

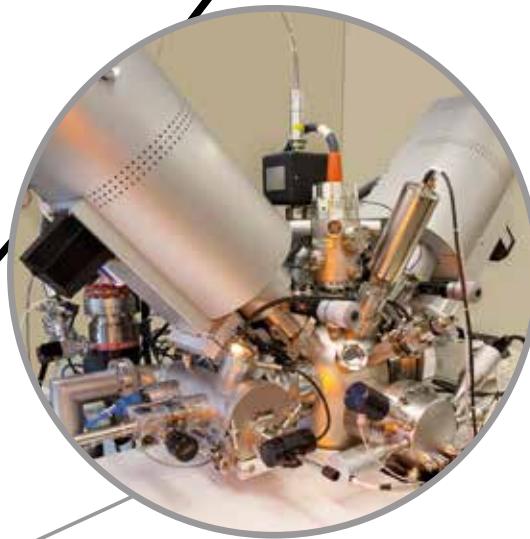
Das Fraunhofer IAF bietet eine Vielzahl von Messsystemen zur Charakterisierung von integrierten Schaltungen und Hochfrequenz-Modulen; z. B. Leistungs- und rauscharme Verstärker, Mischer, Frequenz-Vervielfacher, Oszillatoren, Schalter und Phasenschieber:

- S-Parameter bis 1,1 THz
- Load-pull bis 110 GHz
- Rauschparameter bis 50 GHz
- Rauschzahl bis 750 GHz
- Leistung bis 300 GHz
- Intermodulation bis 50 GHz



On-wafer RF measurement set-up.

On-Wafer HF-Messplatz.



Secondary ion mass spectrometer.
Sekundärionen-Massenspektrometer.

Analysis of semiconductors, thin films, and heterostructures

At Fraunhofer IAF a range of analytical techniques is available for an in-depth structural and chemical characterization of bulk semiconductors, semiconductor heterostructures, as well as thin films. Furthermore, a set of optical analytical techniques is available.

- X-ray diffractometry
- Energy-dispersive X-ray analysis
- Force microscopy
- Electron microscopy
- Secondary ion mass spectrometry
- Photoluminescence spectroscopy
- Spectroscopic ellipsometry
- Raman spectroscopy

Materialanalytik für Halbleiter- schichten und Heterostrukturen

Das Fraunhofer IAF verfügt über eine Reihe analytischer Verfahren zur chemischen und strukturellen Charakterisierung von Volumenhalbleitern, Halbleiterheterostrukturen sowie Dünnschichtsystemen. Diese werden ergänzt durch optische Analysetechniken.

- Röntgendiffraktometrie
- Energiedispersive Röntgenanalyse
- Kraftmikroskopie
- Elektronenmikroskopie
- Sekundärionen-Massenspektrometrie
- Photolumineszenzspektroskopie
- Spektroskopische Ellipsometrie
- Raman-Spektroskopie

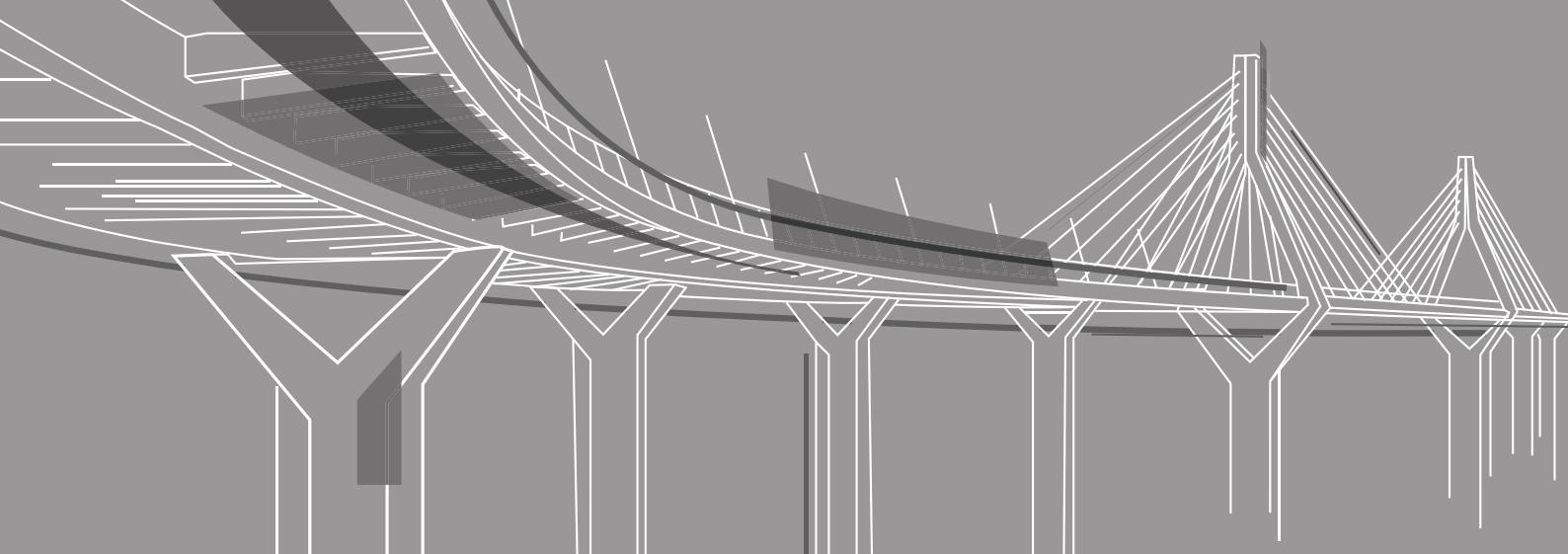
BUSINESS UNITS – BRIDGING THE GAP

HIGH FREQUENCY ELECTRONICS HOCHFREQUENZELEKTRONIK

- 28** Optimizing the Safety of Production Lines by Millimeter-waves
Optimierung der Produktionssicherheit mit Millimeterwellen
- 32** High Precision W-band Distance Measurement Radar
W-Band-Radar für hochpräzise Abstandsmessung
- 36** Millimeter-wave Wireless Links Extending High Capacity Networks
Millimeterwellen-Richtfunk zur Erweiterung von Datennetzen
- 40** Millimeter-wave Radar for Hostile Fire Indication
Millimeterwellen-Radar zur Detektion von feindlichem Beschuss

POWER ELECTRONICS LEISTUNGSELEKTRONIK

- 44** Gallium Nitride Amplifiers for the 5G Mobile Communication Standard
Galliumnitrid-Verstärker für den 5G-Mobilfunkstandard
- 48** GaN-Based Transistors for Mobile Communication
GaN-basierte Transistoren für die Mobilkommunikation
- 52** Gallium Nitride – more than Power
Galliumnitrid – mehr als Leistung
- 56** GaN-based Circuits for W-band High Power Applications
GaN-basierte Schaltungen für W-Band-Leistungsanwendungen



PHOTODETECTORS

PHOTODETEKTOREN

- | | |
|-----------|---|
| 60 | Bridging Security Gaps with Infrared Detectors
Mit Infrarot-Detektoren Sicherheitsrisiken überbrücken |
| 64 | Europe's First Long-wave Infrared Superlattice Camera
Erste europäische Übergitterkamera für das langwellige Infrarot |
| 68 | High-sensitivity Photodetectors
Photodetektoren mit hoher Empfindlichkeit |
| 72 | Structural Quality of AlGaN Layers for UV Photodetectors
Strukturelle Qualität von AlGaN-Schichten für UV-Photodetektoren |

SEMICONDUCTOR LASERS

HALBLEITERLASER

- | | |
|-----------|---|
| 76 | Optimizing Production Processes with Quantum Cascade Lasers
Mit Quantenkaskadenlasern Produktionsprozesse optimieren |
| 80 | Standoff Detection of Explosives and their Precursors
Ferndetektion von Explosivstoffen und deren Vorlaufmaterialien |
| 84 | Reliable LEDs for Harsh Environments
Zuverlässige LEDs für anspruchsvolle Anwendungen |
| 88 | Efficient Semiconductor Disk Lasers for Wavelengths > 2 µm
Effiziente Halbleiter-Scheibenlaser für Wellenlängen > 2 µm |

SEMICONDUCTOR SENSORS

HALBLEITERSENSOREN

- | | |
|------------|---|
| 92 | Diamond as a Bridge to Quantum Physics
Diamant als Brücke zur Quantenphysik |
| 96 | Jewelry Diamond from PECVD Reactors
Schmuck-Diamant aus PECVD-Reaktoren |
| 100 | Diamond – more than a Gemstone
Diamant – mehr als Schmuck |
| 104 | AlScN – a New Piezoelectric Material for High Frequency Filters
AlScN – ein neues piezoelektrisches Material für Hochfrequenzfilter |

HIGH FREQUENCY ELECTRONICS

HOCHFREQUENZELEKTRONIK

MICHAEL SCHLECHTWEG
michael.schlechtweg@iaf.fraunhofer.de

**Optimizing the safety of production lines
by millimeter-waves**

**Optimierung der Produktionssicherheit
mit Millimeterwellen**

»Industry 4.0? For us, this means that our technologies have to be made fit for the specific requirements of networked systems in industrial environments. This includes the development of technologies which can transmit vast quantities of data fast and securely in order to enable real-time systems for production processes. We also aim at providing radar solutions which will make the production environments for both humans and machines safer, for instance by slowing down the movements of robots as soon as there is an unexpected approach.«

Michael Schlechtweg who is dealing with high frequency circuits at Fraunhofer IAF.

»Industrie 4.0? Für uns heißt das, unsere Technologien für die speziellen Anforderungen vernetzter Systeme in Industrienumgebungen fit zu machen. Beispielsweise Funkmodule bereitzustellen, die die unzähligen Daten schnell und sicher übermitteln und so Echtzeit-Kommunikation für Produktionsprozesse ermöglichen. Oder Radarlösungen zu entwickeln, die Produktionsumgebungen für Mensch und Maschine sicherer machen. Zum Beispiel indem sie dafür sorgen, dass Roboter ihre Bewegungen verlangsamen, sobald sich jemand unvorhergesehen nähert.«

Michael Schlechtweg, der sich am Fraunhofer IAF mit Hochfrequenzschaltungen befasst.



HIGH FREQUENCY ELECTRONICS

HOCHFREQUENZELEKTRONIK



Michael Schlechtweg

Head of Business Unit »High Frequency Electronics«



Studies: Electrical engineering and telecommunications

PhD: Modelling of high frequency transistors

Fraunhofer IAF staff member: since 1989

Focus of research: Design of circuits and amplifiers

Mr. Schlechtweg, you have been working in the »High Frequency Electronics« unit at Fraunhofer IAF for 26 years now. What has changed since then?

Essentially, we are still dealing with similar high frequency technologies, but the frequencies, performance and systems capability of our components have considerably improved over time and have also become more stable. Initially, we only produced the components at the institute, then intergrated chips followed, in 1992 we had the first module – and today we are approaching systems solutions, which become increasingly complex.

Recently, the position of department and business unit manager has been split into two. What is your focus in your role as head of the business unit?

I want to put a great emphasis on the investigation of further application fields. This includes the analysis of potentially new

markets and the selective, in-depth engagement with technology and physics in order to discover new applications we are currently unaware of. In my opinion, sensor systems based on our radar modules in communications technology for space and terrestrial applications as well as industry automation currently possess the biggest potential in this respect.

What kind of basic technologies does the business unit contribute to and where is it headed?

Our semiconductor technology is and remains the basis for high frequency transistors. And we will of course continue to focus on the further development of these strengths, for example by opening up to higher frequency ranges. But we are also confronted with a paradigm shift: pushing our technology forward won't be the sole purpose anymore. Instead we will have to incorporate our components into the mosaic of other technologies. Besides our core competences, the focus will also be placed on signal processing electronics or software. The shift from single to multi-channel systems in order to realize real-time and 3D capabilities will also be of particular importance.

This year's annual report is dealing with the topic of »building bridges«. In which area of your business unit were you already able to establish a stable bridge towards application?

Our W-band radar in particular is interesting for a number of applications. Today the radars' small case not only holds a chip, but also a little Linux computer, an analog-digital converter, and electronics for various interfaces. One of the most prominent examples with regard to commercial maturity certainly is our 94 GHz radar as a helicopter landing aid for the company ESG. It supplies pilots during so-called brown- or white-out effects with the exact distance to the ground regardless of snow clouds, dust, or fog.

***Herr Schlechtweg, Sie sind bereits seit 26 Jahren am IAF in der »Hochfrequenz-
elektronik«. Was hat sich seither verändert?***

Nach wie vor sind es im Grunde ähnliche Hochfrequenz-Technologien, aber wir sind über die Zeit natürlich viel besser und stabiler geworden: in den Frequenzen, der Leistungsfähigkeit und auch hinsichtlich der Systemfähigkeit. Zunächst haben wir am Institut nur die Bauelemente hergestellt, dann folgten die integrierten Chips, 1992 das erste Modul – und heute gehen wir mehr und mehr in Richtung komplexer Systemlösungen.

***Zukünftig sind Abteilungs- und Geschäftsleitung am Fraunhofer IAF getrennt.
Worauf möchten Sie sich in Ihrer Rolle als Geschäftsfeldleiter für die »Hochfrequenz-
elektronik« besonders konzentrieren?***

Ich möchte mich verstärkt um die Erschließung neuer Anwendungsfelder kümmern. Das bedeutet, potenzielle neue Märkte zu analysieren und teilweise wieder tiefer in die Technik und Physik einzusteigen, um neue Anwendungen zu finden, an die wir noch gar nicht denken. Das größte Potenzial sehe ich in Sensorikanwendungen mit unseren Radarmodulen in der Kommunikationstechnik für Weltraum- und erdgestützte Anwendungen sowie die Industrieautomatisierung.

Was bringt das Geschäftsfeld dafür an Basistechnologien mit und wo geht es noch hin?

Unsere Halbleitertechnologie ist und bleibt die Basis für die Hochfrequenz-Transistoren. Und es wird weiterhin darum gehen, hier die Stärken auszubauen, also beispielsweise immer höhere Frequenzbereiche zu erschließen. Zudem sehen wir uns aber einem Paradigmenwechsel gegenüber: Es wird in Zukunft nicht mehr nur darum gehen, unsere Technologie weiter voranzutreiben, sondern unsere Bauelemente in das Mosaik verschiedenster anderer Technologien einzubauen. Neben unseren Kerntechnologien geht es also zunehmend auch um die Signalverarbeitungs-Elektronik oder die Software. Zudem wird es darum gehen, vom Einkanal zum Mehrkanalsystem und damit zur Echtzeitfähigkeit und zur 3D-Fähigkeit zu gelangen.

***In diesem Jahr geht es im Jahresbericht um das Thema »Brücken bauen«. Wo ist in
Ihrem Geschäftsfeld die Brücke hin zur Anwendung schon besonders gut gelungen?***

Insbesondere unser W-Band-Radar ist bereits für eine ganze Reihe von Anwendungen interessant. In dem kompakten Gehäuse sitzt heute nicht mehr nur der Chip, sondern auch ein kleiner Linux-Rechner, ein Analog-Digital-Wandler und die Elektronik für verschiedenste Schnittstellen. Eines der prominentesten Beispiele in Bezug auf die Einsatzreife ist unser 94 GHz-Radar als Hubschrauberlanderradar der Firma ESG. Es liefert Piloten bei sogenannten Brown- oder White-out-Effekten trotz Schneewolken, Sand oder Nebel exakte Höhen- und Bodenabstandsdaten.

HIGH PRECISION W-BAND DISTANCE MEASUREMENT RADAR

W-BAND-RADAR FÜR HOCHPRÄZISE ABSTANDSMESSUNG

CHRISTIAN ZECH
christian.zech@iaf.fraunhofer.de

W-band radar



- 94 GHz carrier frequency, 15 GHz bandwidth
- Up to several 100 m range of coverage
- Resolution in the cm range for several targets
- Accuracy below 10 µm for single targets
- Small size (78 x 42 x 28 mm³) and low weight (160 g)

Millimeter-waves are getting increasingly important, as they offer unique properties which can be used for a various range of applications. Since the wavelength decreases linearly with frequency, the required size and volume of a millimeter-wave system decreases with quadratic and cubic relation, respectively. Thus, the development of modern, high-frequency technologies can pave the way for the realization of a new generation of precise and ultra-compact radar systems.



The automotive radar, working at 77 GHz, is the best example for a commercially successful application of millimeter-waves (mmW). However, high-frequency radars in general can offer new possibilities for many other measurement tasks. Compared to laser-based systems, radar can work even under harsh environmental conditions such as dust, smoke, or fog. Hence, radar can be used to address problems which cannot be solved with nowadays technology. Nevertheless, radar-based solutions still have a low market acceptance, as low-frequency systems are huge in size and high-frequency systems are still very expensive, due to the use of precision milled waveguides. In particular, precision short-range distance measurements are still a domain of laser measuring technology. Commercially available radar systems (such as at 24 GHz or automotive radars at 77 GHz) offer only a very limited bandwidth and are thus unsuitable for high-performance demands. The metamorphic high-electron mobility transistor (mHEMT) technology at Fraunhofer IAF can be used for monolithic millimeter-wave integrated circuits (MMICs), which address



1 *Harsh environmental conditions, like in steelworks, still often cause unsolved measurement scenarios for industrial process control.*

Raue Umgebungsbedingungen, wie in Stahlwerken, führen nach wie vor häufig zu ungelösten Messanforderungen in der industriellen Prozesskontrolle.

Millimeterwellen gewinnen zunehmend an Bedeutung, da sie aufgrund ihrer einzigartigen Eigenschaften für eine Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden können. Die Wellenlänge verkürzt sich proportional mit zunehmender Frequenz; Flächen- und Volumenanforderungen von Systemen sinken dabei sogar mit quadratischer bzw. kubischer Relation. Daher liefert die Entwicklung neuer Hochfrequenztechnologien die Grundlage für die nächste Generation kompakter und präziser Radarsysteme.

Automotive-Radarsysteme bei 77 GHz sind das beste Beispiel für einen kommerziell erfolgreichen Einsatz von Millimeterwellen (mmW). Dabei könnten Hochfrequenzradare in vielen anderen Anwendungen neue Möglichkeiten eröffnen. Im Vergleich zu optischen Lasersystemen arbeiten Radare auch unter widrigsten Umweltbedingungen wie Staub, Rauch oder Nebel zuverlässig. Dadurch können sie zukünftig für Problemstellungen eingesetzt werden, die mithilfe heutiger Technologien nicht gelöst werden können. Trotz ihrer Vorteile haben Radar-basierte Lösungen bislang nur eine geringe Marktakzeptanz, da niederfrequente Systeme zu groß und hochfrequente Systeme nach wie vor zu teuer in der Herstellung sind. Besonders der Bereich hochpräziser Abstandsmessungen im Nahbereich wird von Lasersystemen dominiert. Kommerziell erhältliche Radarsysteme (wie 24 GHz oder 77 GHz-Sensoren) decken nur eine geringe Bandbreite ab und sind daher ungeeignet für Präzisionsmessungen.

Die metamorphe High-Electron-Mobility-Transistor (mHEMT)-Technologie des Fraunhofer IAF kann dazu genutzt werden, monolithisch integrierte Millimeterwellenschaltungen (MMICs) herzustellen, welche speziell auf die Anforderungen hochleistungsfähige Anwendungen bei höchsten Betriebsfrequenzen abgestimmt sind. In Kooperation mit dem Fraunhofer IZM wurde eine kostengünstige Aufbau- und Verbindungstechnik auf Platinenbasis entwickelt, um zukünftig Hohlleiter-basierte Aufbauten in Hochfrequenzsystemen zu ersetzen und somit Kosten zu reduzieren.

94 GHz FREQUENCY / FREQUENZ

Output frequency of the radar module, ideally suited for high-precision measurements.

Sendefrequenz des Radarmoduls, ideal geeignet für präzise Abstandsmessungen.

Hochfrequenz-Platinentechnologie für kosteneffiziente Systeme

Das gesamte Radar-Front-End konnte auf einer Platine integriert werden (Abb. 2). Um die W-Band-Signale direkt auf dem Board verteilen zu können, wurde ein spezieller Lagenaufbau, aus der Kombination eines 50 µm dicken Flüssigkristall-Polymersubstrats (LCP) und einem FR-4-Kern, entwickelt. Der in unserer 100 nm mHEMT-Technologie realisierte Radar-MMIC enthält alle erforderlichen Hochfrequenzkomponenten (wie Frequenzvervielfacher, Verstärker und Mischer) und ist in einer Laserkavität im LCP eingelassen, wodurch kurze Bondverbindungen mit geringer parasitärer Induktivität ermöglicht werden. Zudem ist auf dem LCP eine antipodale Vivaldi-Antenne mit 23 dBi Gewinn und 11° Öffnungswinkel integriert. Im Bereich der Antenne wird der FR-4-Kern ausgefräst, sodass eine freischwebende LCP-Membran entsteht. Darauf wird ein dielektrischer Konus mit integrierter Linse platziert, um den Öffnungswinkel der

high-performance applications at highest frequencies. In co-operation with Fraunhofer IZM, a cost-efficient printed circuit board (PCB)-based mounting and interconnecting technology has been developed to replace waveguides and reduce costs for high-frequency systems.

High-frequency printed circuit board technology for cost-efficient front-ends

The high-frequency front-end has been integrated on a single PCB (Fig. 2). In order to handle W-band signals directly onboard, a special layer setup, consisting of a 50 μ m thin layer of liquid crystal polymer (LCP) on top of a FR-4-based core has been developed. The PCB consists of 7 metallization layers, where only the top one is used for the routing of analog and high-frequency signals.

the receiver chain by highly reflective nearby targets, the output driver is realized as a variable gain amplifier, providing a dynamic range of 30 dB. High-performance phase operation is ensured by use of a phase-locked loop circuitry to stabilize the system reference. The total size of the front-end is only 40 mm x 36 mm.

High-precision distance measurements

The module is powered by a single 7 – 18 V external power supply and can be accessed via universal asynchronous receiver/transmitter (UART), Universal Serial Bus (USB), or Ethernet connection. The integrated digital signal processor (DSP), running an embedded μ CLinux kernel, handles the digital interfaces of the module as well as the internal components. All system-relevant parameters can be controlled by software,

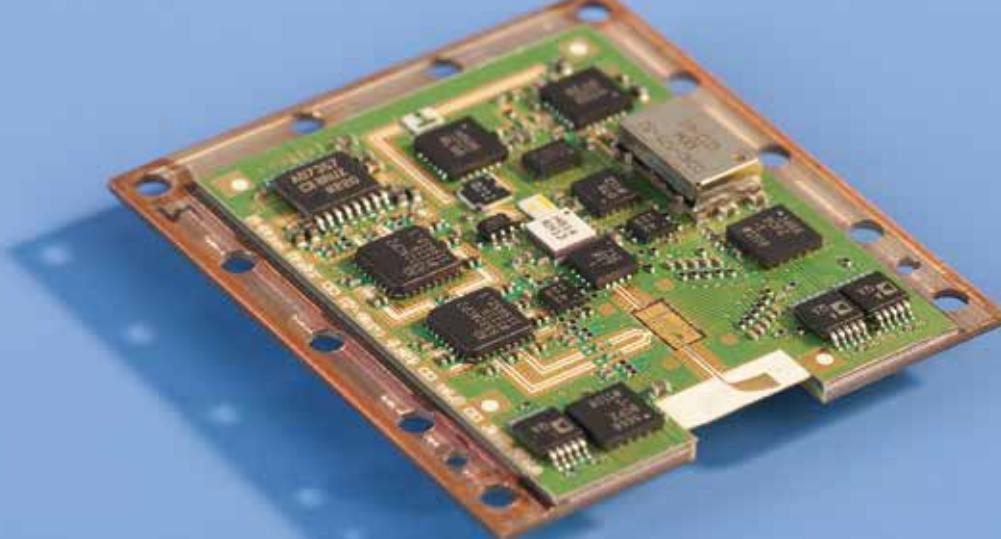
»Our high-end millimeter-wave technology enables the development of high-precision radar sensors, which can be used to address up to now unsolved measurement demands.«

Christian Zech, group »Sensor Systems«.

A single-chip radar MMIC, based on our in-house 100 nm mHEMT technology, contains all the required high-frequency components (such as frequency multiplier, amplifiers and mixer). The MMIC is embedded into a laser cavity in the polymer substrate, enabling short zero-tail bond-wire connections without a parasitic inductive loop. An onboard, anti-podal Vivaldi antenna is realized on the LCP substrate, featuring a gain of 23 dBi as well as an aperture angle of 11°. Therefore, the FR-4 core is milled out in the area of the antenna, resulting in a free-standing LCP membrane. A dielectric cone with integrated lens is placed on the antenna to modify the aperture angle of the radar beam. To adjust the transmitted power of the module to the current scenario, e. g. to avoid overdriving

allowing a flexible use and easy customization. To investigate the precision of the module, a set of 200 measurements was performed in series for a target at a fixed distance of 57 cm. A bandwidth of 15 GHz and a ramp duration of 2.5 ms was chosen, resulting in a chirp rate of 6 THz/s. The maximum deviation of the measurements is $\pm 0.8 \mu$ m, the standard deviation (σ) is 0.3 μ m. As a result, the measurement error is below 1 μ m for 99.7 % (3 σ) of all measurements.

In conclusion it can be stated that radar is an excellent candidate to supplement laser systems for high-precision distance measurements in harsh environments to address new fields of sensor applications.



2 The high-frequency radar front-end is realized on a single printed circuit board with a size of 40 mm x 36 mm.

Das gesamte Hochfrequenz-Front-End ist auf einer Platine von 40 mm x 36 mm integriert.

Radarkeule anzupassen. Die Leistung des Sendeverstärkers kann über einen Dynamikbereich von 30 dB variiert und somit auf das Szenario abgestimmt werden. Dadurch wird zum Beispiel ein Übersteuern des Empfängers bei nahen und stark reflektierenden Zielen verhindert. Zur Gewährleistung der erforderlichen Phasenstabilität des Sendesignals ist die Systemreferenz mithilfe einer Phasenregelschleife stabilisiert. Die Größe der Hochfrequenzplatine beträgt 40 mm x 36 mm.

Hochpräzise Abstandsmessungen

Das Modul kann mit einer externen Spannungsquelle von 7 – 18 V betrieben werden. Der Datenaustausch erfolgt über Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART), Universal Serial Bus (USB) oder Ethernet-Schnittstelle. Im Modul läuft ein eingebetteter µCLinux-Kernel auf einem digitalen Signalprozessor, der sowohl die digitalen Schnittstellen betreibt, als auch die internen Komponenten ansteuert. Alle systemrelevanten Parameter können per Software variiert werden, wodurch eine einfache und flexible Anpassung des Radarmoduls möglich ist. Zur Untersuchung der Messgenauigkeit wurde eine Serie von 200 Messungen in einer statischen Szenerie durchgeführt. Die dabei verwendete Bandbreite beträgt 15 GHz, die Rampendauer 2,5 ms. Die maximale Abweichung der Messungen vom Mittelwert ist $\pm 0,8 \mu\text{m}$, die Standardabweichung (σ) $0,3 \mu\text{m}$. Somit liegt der Messfehler für 99,7 % (3σ) der Messungen bei unter $1 \mu\text{m}$.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Radare ideal dazu geeignet sind, Lasersysteme für hochpräzise Abstandsmessungen, besonders unter widrigen Umgebungsbedingungen, zu ergänzen und zukünftig neue Messanwendungen zu adressieren.

0.3 μm
DEVIATION /
ABWEICHUNG

Standard deviation of the measured distance for a series of 200 measurements.

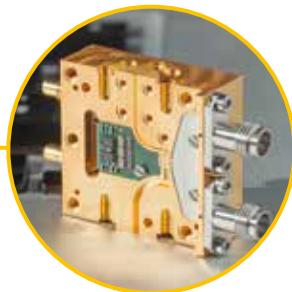
Standardabweichung des gemessenen Abstands für eine Reihe aus 200 Messungen.

MILLIMETER-WAVE WIRELESS LINKS EXTENDING HIGH CAPACITY NETWORKS

MILLIMETERWELLEN-RICHTFUNK ZUR ERWEITERUNG VON DATENNETZEN

THOMAS MERKLE
thomas.merkle@iaf.fraunhofer.de

Integrated point-to-point radio front-ends



- Frequency bands: 71 – 86, 220 – 260, 275 – 325 GHz
- Waveguide module technology, typical size: 35 x 30 x 20 mm
- Verified for data rates > 40 Gbit/s
- Output power > 1 mW at 300 GHz



The connection between base stations and base station antennas of future 5G networks will require high data rates of more than 100 Gbit/s. The connectivity of machines, the increasing communication needs of production sites, financial districts, and data centers, access to remote rural areas: all these are challenges of Industry 4.0 that cannot solely be addressed by optical fiber technology. The new generation of millimeter-wave wireless links up to 300 GHz will offer a low-cost extension within the next 3 years.

Every individual of today's high-tech society should have access to reliable, inexpensive high-speed data communication infrastructure. It is a basic demand in order to have the freedom to choose where one would like to live and work, to be productive, and to stay connected to modern media and cultural life. The digital divide is an increasing problem even in industrial countries. Production sites, engineering offices, and small and medium sized enterprises in rural areas face a severe disadvantage for that reason.

Fiber optical networks offer capacities of Tbit/s over distances of more than 1000 km. This is the technology that communities and administrations have in mind first when access to rural areas is discussed. However, it is not always and everywhere a cost-effective solution. Some negative examples are inaccessible terrain and access to rural areas, or situations where the capacity demand is not permanent but fluctuates, e. g. in holiday regions or at public events.



1 Millimeter-wave links will solve the communication needs of production sites.

Millimeterwellen-Links als Lösung für die Bereitstellung schneller Datennetze.

Die Verbindung zwischen Basisstationen und deren Antennen in zukünftigen schnellen 5G-Mobilfunknetzwerken erfordern hohe Datenraten bis über 100 Gbit/s. Die Vernetzung von Maschinen, der steigende Datenbedarf in Produktionsstätten, Finanz- und Datenzentren, der Zugang zu ländlichen Gebieten, all dies sind Herausforderungen von Industrie 4.0, die nicht allein durch den Glasfaserausbau gelöst werden können. Die neue Generation von drahtlosen Millimeterwellen-Richtfunk-Verbindungen bei 300 GHz wird dazu in den nächsten 3 Jahren eine kostengünstige Erweiterung bieten.

Jeder in unserer heutigen Gesellschaft sollte Zugang zu einer zuverlässigen, kostengünstigen Kommunikationsinfrastruktur mit hohen Datenraten haben. Es ist heute ein Argument für die Entscheidung, wo man lebt und arbeitet. Vielen ist es wichtig, überall produktiv sein zu können und an die modernen Medien und das kulturelle Leben angebunden zu bleiben. Die digitale Teilung der Gesellschaft ist selbst in Industrienationen ein wachsendes Problem. Produktionsstätten, Ingenieursbüros sowie kleine und mittelständische Unternehmen in ländlichen Räumen werden dadurch ernsthaft benachteiligt.

Glasfasernetzwerke bieten Tbit/s-Kapazitäten über Entfernungen von mehr als 1000 km. Gemeinden und Verwaltungsbehörden diskutieren deshalb zu allererst über diese Technologie bei der Erschließung des ländlichen Raums. Allerdings ist es nicht immer und überall die kosten-effektivste Lösung. Problematisch sind unzugängliches Terrain und Landflächen oder Situationen, wo der Kapazitätsbedarf nicht permanent besteht, sondern stark fluktuiert, wie in Urlaubsregionen und bei öffentlichen Veranstaltungen. Die dafür anfallenden Infrastrukturkosten pro Benutzer werden meist nicht akzeptiert und man verzichtet lieber auf den Hochgeschwindigkeitsanschluss.

300 GHz

CARRIER FREQUENCY / TRÄGERFREQUENZ

Front-end modules for wireless radio links at 300 GHz with data rates up to 100 Gbit/s.
Front-End-Module für die Funkübertragung bei 300 GHz mit Datenraten bis zu 100 Gbit/s.

Die neuesten Fortschritte bei den Millimeterwellen-Front-End-Technologien eröffnen kostengünstige Ansätze für die Fortsetzung von optischen Glasfasernetz-Kapazitäten bis in die Ortschaft oder das Firmengebäude. Die Forschung des Fraunhofer IAF konzentriert sich seit einigen Jahren auf breitbandige hochleistungsfähige Front-End-Technologien für die nächste Generation drahtloser Millimeterwellen-Punkt-zu-Punkt-Verbindungen. Heutzutage können wir Lösungen für Entfernungen bis 15 km und Datenraten bis zu 100 Gbit/s anbieten, die an die jeweiligen Anwendungsszenarien unserer Industriepartner angepasst werden können. Dies stellt eine Steigerung der Datenraten um den Faktor 10 – 100 im Vergleich zu kommerziell existierenden drahtlosen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen dar. Die robusten Gehäuse unserer Front-Ends sind ideal für Anwendungen im Freien, die absolut zuverlässige Verbindungen fordern. Zusätzliche Packaging-Lösungen zielen auf kostengünstige Anwendungen in Innenräumen ab. Diese entwickeln wir derzeit für Frequenzen bis 300 GHz.

The infrastructure costs do not find the customer's approval and people rather accept slower connection.

Latest advances in millimeter-wave wireless front-end technologies enable an elegant low-cost approach for extending high capacity fiber optical networks to the town or the business. The research of Fraunhofer IAF has focused on broadband high-performance front-end technologies for next generation wireless millimeter-wave point-to-point links for several years. Today we can offer solutions for distances of more than 15 km and data rates of up to 100 Gbit/s, which can be customized to the various specific application scenarios of our industry partners.

»The digital divide is a social challenge that has to be urgently addressed by new communication infrastructure technology.«

Thomas Merkle, group »Circuits«.

It represents a factor of 10 – 100 increase in performance compared to existing wireless point-to-point links. The rugged packages of our front-ends are ideal for outdoor applications that require highly reliable links. Additional packaging solutions targeting low cost indoor end-user application scenarios are currently in development for frequencies up to 300 GHz.

100 Gigabit per second, wireless at 300 GHz

The 275 – 325 GHz frequency range is one of the most promising frequency bands for implementing very high-speed wireless point-to-point links. The available frequency bands below 100 GHz are rather fragmented and they are already allocated for specific applications. For this reason, there are joint standardization efforts towards reserving a 50 GHz wide

continuous spectrum at 300 GHz in Europe, the US, and Asia, dedicated to very high-speed wireless link applications (»100G radios»).

Our current broadband integrated monolithic microwave integrated circuits (MMICs) and modules at 300 GHz are the first ones available and ready to be employed in prototype wireless point-to-point systems and application scenarios. In a laboratory environment, we have verified data rates of up to 64 Gbit/s, only limited by the available test equipment. Our current research and development activities are focused on further increasing the integration level and functionality of the front-ends, as well as their performance.

Fraunhofer IAF has been designing broadband integrated circuit components up to more than 600 GHz for many years. High performance front-end components, e. g. low-noise and power amplifiers, mixers, and multiplier circuits are available. They offer high bandwidths exceeding 40 GHz. Our industry partners have access to those high performance integrated circuit blocks (»IP cores«) and we offer to develop customized front-end MMIC solutions with short turn-around time based on these sub-components. The 35 nm metamorphic HEMT process is a mature technology. Our research addresses higher volume markets consistent with the demand created by the high data rate infrastructure networks of the near future. Fraunhofer IAF offers consultancy, design, and manufacturing services to accelerate the development of innovative next generation communication links.



2

2 Monolithic microwave integrated front-end chip for extending fiber optical networks in urban areas. Monolithisch integrierter Front-end-Chip für die drahtlose Erweiterung von Glasfasernetzen in urbanen Räumen.

100 Gbit pro Sekunde über Funk bei 300 GHz

Das Band von 275 – 325 GHz ist eines der vielversprechendsten Frequenzbänder für die Implementierung von drahtlosen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen mit höchsten Datenraten. Die verfügbaren Frequenzbänder unter 100 GHz sind recht fragmentiert und bereits für spezifische Anwendungen reserviert. Aus diesem Grund gibt es in Europa, den USA und Asien gemeinsame Standardisierungsbemühungen zur Reservierung eines 50 GHz weiten zusammenhängenden Frequenzbandes bei 300 GHz, das speziell für drahtlose Hochgeschwindigkeits-Verbindungen genutzt werden soll (»100G Radios«).

Unsere aktuellen breitbandigen monolithisch integrierten Millimeterwellenschaltungen (MMICs) und -module sind die ersten, die verfügbar und bereit zum Einsatz in drahtlosen Punkt-zu-Punkt-Verbindungsprototypen und Anwendungsszenarien sind. Die Datenraten wurden in Laborumgebung bis 64 Gbit/s verifiziert, begrenzt durch die Labortestgeräte, die für höhere Datenraten noch nicht verfügbar sind. Unsere derzeitigen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten fokussieren sich auf die weitere Erhöhung des Integrationsgrads, der Funktionalität des Front-Ends sowie dessen Leistungsmerkmale.

10 – 100 x PERFORMANCE INCREASE / VERBESSERUNGS- FAKTOR

The Fraunhofer IAF front-end technology can increase the data rates by a factor of 10 – 100.

Mit der Fraunhofer IAF Front-End-Technologie können die Datenraten um den Faktor 10 – 100 gesteigert werden.

Das Fraunhofer IAF entwirft seit vielen Jahren breitbandige integrierte Schaltungskomponenten bis über 600 GHz. Eine Vielzahl von hochleistungsfähigen Front-End-Komponenten, z. B. rauscharme Verstärker und Leistungsverstärker, Mischer- und Vervielfacher-Schaltungen, sind schon heute am Fraunhofer IAF verfügbar. Sie bieten Bandbreiten über 40 GHz. Unsere Industriepartner haben Zugang zu diesen hoch-performanten integrierten Schaltungsblöcken (»IP cores«) und wir bieten basierend auf diesen Sub-Komponenten die Entwicklung von kundenspezifischen Front-End-Lösungen mit sehr kurzen Bearbeitungszeiten an. Der 35 nm metamorphe HEMT-Prozess ist eine ausgereifte Technologie. Unsere Forschung adressiert nun Märkte, die höhere Stückzahlen benötigen, in Übereinstimmung mit der erwarteten Nachfrage, die durch zukünftige Hochgeschwindigkeits-Netze generiert wird. Das Fraunhofer IAF bietet Beratungs-, Entwurfs- und Fertigungsleistungen an, um die Entwicklung innovativer Kommunikationsverbindungen der nächsten Generation zu beschleunigen.

MILLIMETER-WAVE RADAR FOR HOSTILE FIRE INDICATION

MILLIMETERWELLEN-RADAR ZUR DETEKTION VON FEINDLICHEM BESCHUSS

AXEL HÜLSMANN
axel.huelsmann@iaf.fraunhofer.de

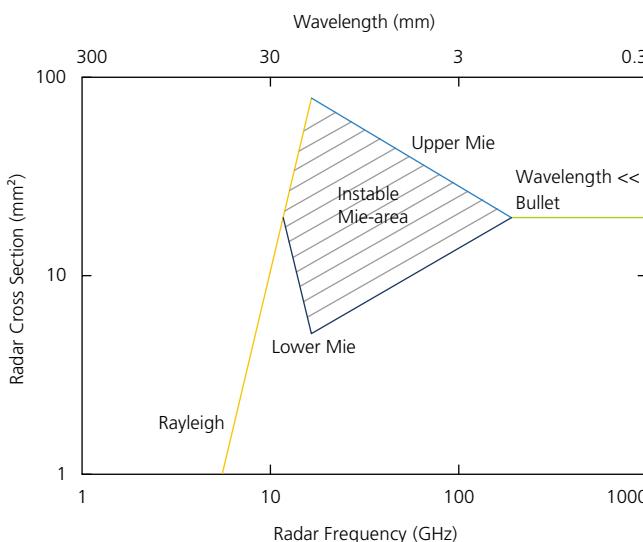
Small and fast objects, for example bullets of caliber 5 to 10 mm, fired from guns like G36 (caliber 5.56 x 45 mm) or AK-47 (caliber 7.62 x 39 mm), can cause serious problems to aircrafts in asymmetric warfare. Especially slow and big aircrafts, like heavy transport helicopters are an easy target for small caliber weapons. These aircrafts produce so much noise, that the crew is not able to recognize an attack unless serious problems occur and important systems of the aircraft fail.

Detection of bullets in warfare, often denoted as hostile fire indication (HFI) in military jargon, is a very challenging task. To counteract this problem, short-wavelength infrared (SWIR) techniques or acoustic sensors have been investigated. However, these methods have the drawback that they are insufficient, as they can detect the muzzle and the detonation

but not the bullet. Artefacts coming from other flashes and noise increase the false alarm rate. In contrast, the recent development of compact radar systems operating at frequencies of 100 GHz and higher is very promising for reliable HFI.

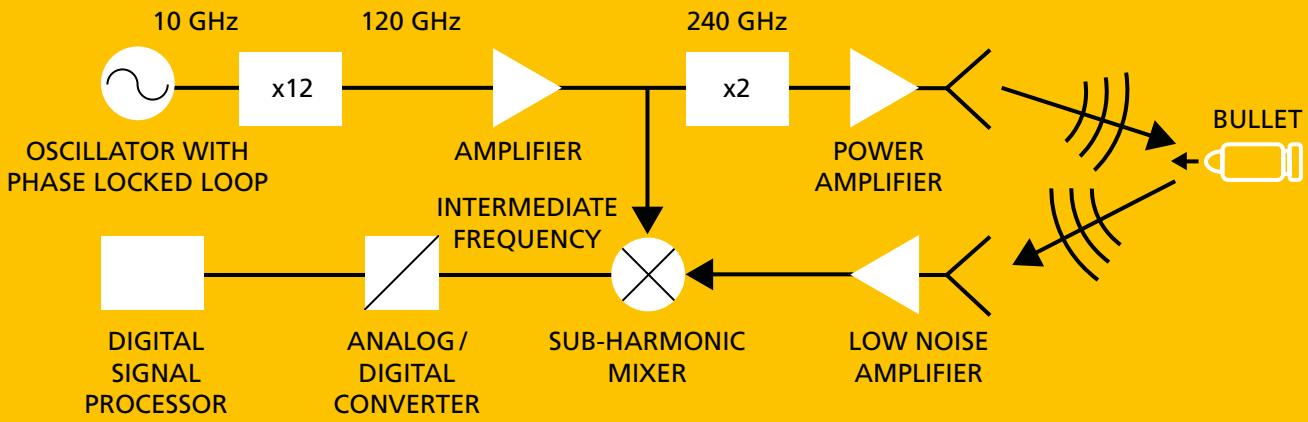
Frequency and radar cross section

If the wavelength λ of the electromagnetic wave is much larger than the radius r of the bullet sphere ($\lambda \gg r$), the radar cross section (RCS) decreases with increasing wavelength with the power of 4, which is known as »Rayleigh-Scattering«. In the high-frequency region, as the radar wavelength λ is less than the bullet diameter, the RCS of a sphere is no longer a function of frequency, the RCS of a sphere becomes πr^2 . A simplified illustration of estimated RCS for a sphere with 5 mm diameter versus radar frequency is plotted in Fig. 1. If the radar frequency is increased beyond 16 GHz, the RCS enters the so called Mie-region, where the RCS is hard to predict due to interference effects. With further frequency increasing the Mie-effect decreases and, at frequencies of more than 190 GHz, the instable Mie-region is left and a stable RCS of $\pi r^2 = 19.6 \text{ mm}^2$ (-47 dBsm) can be predicted.



1 Calculated radar cross section (RCS) of a 5 mm diameter sphere. Rayleigh-scattering at low frequencies ($\lambda \gg r$), instable Mie-area (shaded region) at $\lambda \approx r$, stable RCS at high frequencies ($\lambda \ll r$).
Berechneter Radarquerschnitt einer Kugel mit 5 mm Durchmesser. Rayleigh-Streuung bei niedrigen Frequenzen ($\lambda \gg r$), instabiler Mie-Bereich (schraffiert) bei $\lambda \approx r$, stabiler Radarquerschnitt bei hohen Frequenzen ($\lambda \ll r$).

A bullet fired from a small arm typically has a range of a few kilometers. The atmosphere offers a huge frequency window at H-band (220 – 325 GHz) of up to 90 % transmission for one kilometer distance. To detect small bullets, a radar system should therefore favorably operate in this frequency range with a center frequency of 240 GHz. Using the electro-magnetic simulation tool High Frequency Structure Simulator (HFSS) from Ansys Inc., we calculated the RCS of a bullet for one sight angle as shown in Fig. 3. This is sufficient since the problem is invariant under rotation. In order to point out the influence of Mie-scattering, two different frequencies have been investigated. At 94 GHz, the Mie-effect is modest, but still significant. At 240 GHz we can expect to be outside the Mie-region and within the low-attenuation



2

2 Block diagram of a Doppler radar for hostile fire indication of small arms weapons.

Block-Diagramm eines Doppler-Radars zur Detektion von feindlichem Beschuss durch Kleinwaffen.

Kleine, schnell fliegende Geschosse mit Kalibern von 5 bis 10 mm, die zum Beispiel von Schusswaffen wie dem G36 oder dem AK-47 abgefeuert werden, können in der asymmetrischen Kriegsführung ernsthafte Probleme für Luftfahrzeuge hervorrufen. Besonders langsam fliegende und große Luftfahrzeuge, wie die Transporthubschrauber der Bundeswehr, sind ein leichtes Ziel für kleinkalibrige Handfeuerwaffen. Diese Luftfahrzeuge sind so laut, dass die Besatzung einen Angriff erst dann erkennt, wenn Probleme auftreten und wichtige Systeme des Luftfahrzeugs ausfallen.

Die Detektion von feindlichen Geschossen (eng. hostile fire indication, HFI) ist eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. Bisher wurden dazu Verfahren mit kurzwelliger Infrarotstrahlung oder akustischen Sensoren evaluiert. Der Nachteil dieser Methoden liegt darin, dass sie zwar die Gewehrmündung oder die Detonation erkennen, nicht jedoch das Geschoss selbst. Die durch fremde Blitze oder Geräusche hervorgerufenen Artefakte erhöhen die Falschalarmrate. Im Gegensatz dazu sind neue kompakte Radarsysteme mit Arbeitsfrequenzen von 100 GHz und darüber für die Detektion von feindlichem Beschuss sehr gut geeignet.

Frequenz und Radar-Streuquerschnitt

Für elektromagnetische Strahlung, deren Wellenlänge λ viel größer als der Radius r einer Geschoss-Kugel ($\lambda \gg r$) ist, fällt der Radarquerschnitt (eng. radar cross section, RCS) mit der vierten Potenz der Wellenlänge. Dieses Phänomen ist als »Rayleigh-Streuung« bekannt. Wenn jedoch die Radarwellenlänge kleiner als der Geschossdurchmesser ist, wird der RCS einer Kugel frequenzunabhängig und beträgt konstant πr^2 . Eine vereinfachte Darstellung des abgeschätzten Radarquerschnitts einer Kugel mit 5 mm Durchmesser als Funktion der Radarfrequenz ist in Abb. 1 gezeigt. Bei Radarfrequenzen oberhalb von 16 GHz tritt der Radarquerschnitt in den sogenannten Mie-Bereich ein, in dem aufgrund von Interferenzeffekten der RCS schwer voraussagbar ist. Mit weiterer Frequenzerhöhung verringert sich der Mie-Effekt wieder und oberhalb von 190 GHz verlässt der RCS den instabilen Bereich und erreicht einen Wert von $\pi r^2 = 19,6 \text{ mm}^2$ (-47 dBsm).

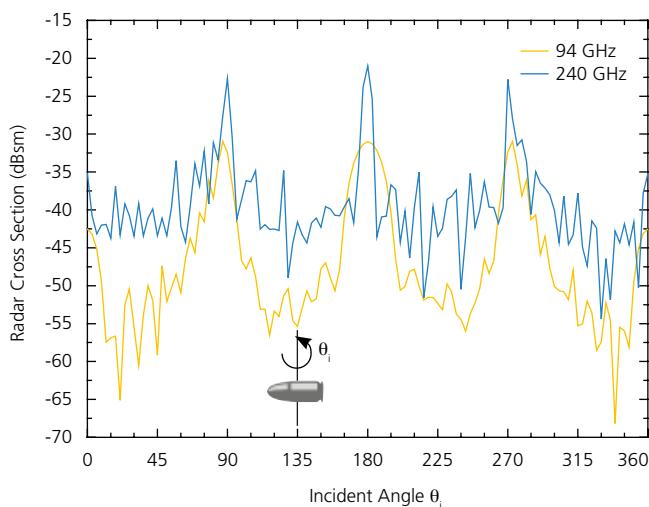
Geschosse aus Handfeuerwaffen haben eine typische Reichweite von einigen Kilometern. Im H-Band (220 – 325 GHz) hat die Atmosphäre ein breites transparentes Frequenzfenster mit einer Transmission von 90 % bei 1 km Entfernung. Um kleine Geschosse zu detektieren, sollte ein Radarsystem daher vorzugsweise in diesem Frequenzbereich und bei einer Mittenfrequenz um 240 GHz arbeiten.

Mithilfe des elektromagnetischen Simulationswerkzeugs »High Frequency Structure Simulator« (HFSS) von Ansys Inc. haben wir den Radarquerschnitt eines Geschosses als Funktion des Winkels, unter dem das Geschoss gesehen wird, berechnet (Abb. 3). Um den Einfluss der Mie-

window of the atmosphere. The simulated RCS for a bullet of a common caliber 5.56 x 45 mm at 94 and 240 GHz is presented in Fig. 3. The 240 GHz radar system provides about 10 dB more average RCS with respect to a 94 GHz radar system which is a substantial improvement.

State of technology

A compact 94 GHz frequency modulating continuous wave (FMCW) radar system has already been developed at Fraunhofer IAF, but the frequency of 94 GHz is still in the Mie-region of handgun calibers. We believe that the 240 GHz frequency range is considerably more suitable for HFI radar applications. The challenge is to build a compact 240 GHz radar system which meets all specifications needed for HFI. A possible block diagram of such a radar is shown in Fig. 2.



3 Simulation of a bullet RCS with caliber 5.56 x 45 mm (5.69 mm diameter, 18 mm length) at 94 and 240 GHz. Θ_i is the incident angle between the radar beam directed at the bullet and the bullet axis.

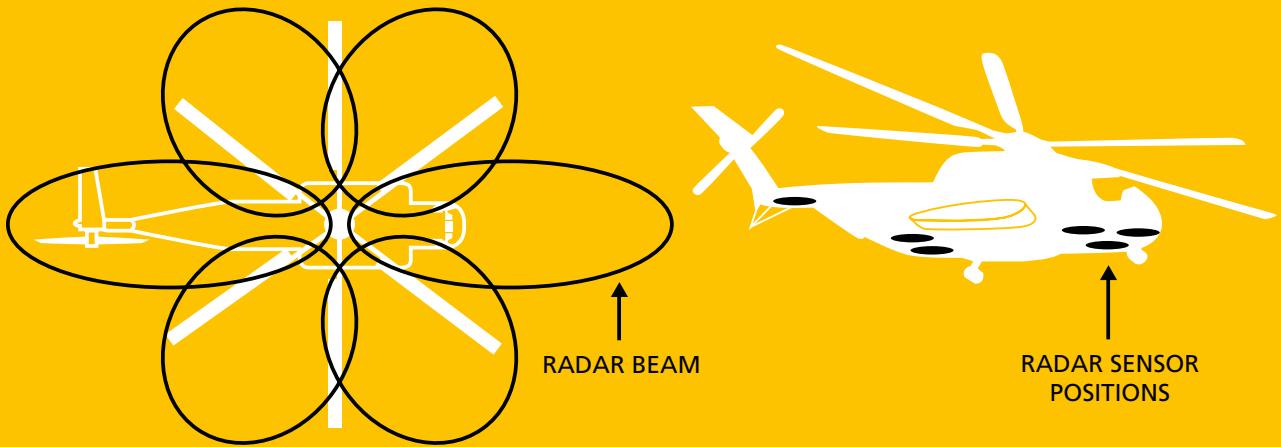
Simulation des Radarquerschnitts eines Geschosses vom Kaliber 5.56 x 45 mm (5,69 mm Durchmesser, 18 mm Länge) bei 94 und 240 GHz. Θ_i ist der Winkel zwischen dem auf das Geschoss gerichteten Radarstrahl und der Geschossachse.

The transmitter part of this radar consists of a 10 GHz oscillator with a phase locked loop, two frequency multipliers x12 and x2 and an amplifier in between. A key component of the transmitter is a 240 GHz power amplifier having an output power of at least 17 dBm (50 mW). The receiver part consists of a 240 GHz low noise amplifier with a low noise figure of 5 dB and a gain of 20 dB, followed by a subharmonic mixer with 0 dB conversion gain and an intermediate frequency of 1.6 MHz. Transmitter and receiver chips should be monolithically integrated and an appropriate antenna must be developed. The radar system needs an analog/digital converter, a digital signal processor with field programmable gate array, and software for Doppler analysis. The first MMICs have been fabricated and characterized at 240 GHz.

At a bullet velocity of 1000 m/s the Doppler frequency shift is significant. Therefore cw-mode radar is preferable, as the distance of the bullet is not of interest. The high velocity of 1000 m/s causes a high intermediate frequency (IF) at the mixer of 1.6 MHz. All other radar echoes coming from clutter will cause much lower IF frequencies and can easily be high-pass filtered.

Conclusions

Assuming that a bullet can enter from all directions, the radar system has to cover the surrounding from all around. A helicopter HFI radar system mainly needs to detect bullets from the lower half space, as shown in Fig. 4, where possible positions of six HFI radar sensors on a helicopter and the corresponding radar beams are illustrated. The optimal antenna gain for a HFI radar system using six sensors can be estimated to be between 10 and 13 dBi. During landing such a system could also switch from CW to FMCW mode to operate as a fog, dust, and snow penetrating ground radar to measure the distance to the ground as well as the drift of the helicopter and therefore operate as a landing aid to handle brown-out or white-out effects.



4

4 Proposed HFI radar system for a transport helicopter with indicated possible positions of six radar sensors and their beam diagrams. Such a system can also be used as a landing aid radar to handle brown-out or white-out effects.

Geplantes Radarsystem zur Detektion von feindlichem Beschuss für Transporthubschrauber mit angedeuteten möglichen Positionen von sechs Radarsensoren und deren Strahlungsdiagrammen. Gleichzeitig kann das Radar als Hubschrauberlandehilfe bei so genannten Brown-out- oder White-out-Effekten genutzt werden.

Streuung zu verdeutlichen, wurden zwei unterschiedliche Frequenzen untersucht. Bei 94 GHz ist der Mie-Effekt noch vorhanden, aber moderat. Bei 240 GHz kann erwartet werden, dass der RCS außerhalb des Mie-Bereichs und innerhalb des Fensters mit niedriger Atmosphärendämpfung liegt. In Abb. 3 ist der simulierte RSC eines Geschosses mit Kaliber 5,56 x 45 mm bei 94 und 240 GHz dargestellt. Verglichen mit einem 94 GHz Radarsystem, liefert das 240 GHz Radarsystem einen um 10 dB höheren mittleren Radarquerschnitt.

Stand der Technik

Am Fraunhofer IAF wurde bereits ein kompaktes 94 GHz frequenzmoduliertes Dauerstrich-Radar (FMCW) entwickelt. Die Radarfrequenz von 240 GHz (Abb. 2) ist zur Detektion von feindlichem Beschuss jedoch wesentlich besser geeignet. Der Senderteil des Radars besteht aus einem 10 GHz Oszillator mit einem Phasenregelkreis, zwei Frequenzvervielfachern (x12 und x2) und einem Verstärker. Die Schlüsselkomponente ist ein noch zu entwickelnder 240 GHz Leistungsverstärker mit 17 dBm (50 mW) Ausgangsleistung. Der Empfänger besteht aus einem 240 GHz 20 dB Verstärker mit einer Rauschzahl von 5 dB, sowie einem subharmonischen Mischer mit 0 dB Konversionsgewinn und 1,6 MHz Zwischenfrequenz. Sender und Empfänger sind monolithisch integrierte Schaltungen. Das komplette Radarsystem benötigt außerdem schnelle Analog/Digital-Wandler, einen digitalen Signalprozessor mit frei programmierbarer Logikschaltung, sowie eine Doppler-Analyse-Software. Die ersten MMICs wurden am Fraunhofer IAF bereits hergestellt und bei 240 GHz charakterisiert.

Der Dopplereffekt von Geschossen mit Geschwindigkeiten um 1000 m/s erzeugt eine erhebliche Frequenzverschiebung. Ein einfaches Doppler-Radar muss nicht unbedingt im FMCW-Modus arbeiten sondern kann auch im Dauerstrich (CW) betrieben werden. Die Mischer-Zwischenfrequenz (IF), die so ein Geschoss erzeugt, liegt bei 1,6 GHz. Echos von allen anderen Objekten erzeugen wesentlich niedrigere Zwischenfrequenzen und können durch einfache Hochpassfilterung unterdrückt werden.

Schlussfolgerungen

Da Geschosse aus allen Richtungen eintreffen können, muss ein HFI-Radarsystem die Umgebung von allen Seiten beobachten. Ein HFI-Hubschrauber-Radarsystem muss dabei vorwiegend Geschosse detektieren, die aus dem unteren Halbraum kommen. In Abb. 4 sind mögliche Positionen von sechs Radarsensoren und deren Strahlungskeulen abgebildet. Der optimale Antennengewinn eines HFI-Radarsystems sollte somit zwischen 10 und 13 dBi liegen. Bei einer Landung könnte ein solches System dann auch vom CW- in den FMCW-Betrieb umschalten und somit als Bodenradar bei Nebel, Staub und Schnee zur Messung von Abstand und Drift verwendet werden, um den Brown-out- oder White-out-Effekt zu beherrschen.

POWER ELECTRONICS LEISTUNGSELEKTRONIK

RÜDIGER QUAY
ruediger.quay@iaf.fraunhofer.de

Gallium nitride amplifiers for the 5G mobile communication standard

Galliumnitrid-Verstärker für den 5G-Mobilfunkstandard

»A 5G mobile communication standard by 2020? This requires a fundamental extension of the bandwidth through the allocation of new frequency bands. Data rates will continue to increase strongly and simultaneously, we drastically have to reduce latency, i. e., technically-caused delays. Not only does this increase the comfort for private users, it is especially interesting for the direct communication of machines (M2M), where even milliseconds of delay disturb entire production processes. This is why we are developing new amplifiers which use 5G, UMTS, and LTE in parallel to communicate with the base station, so that in future 5G networks 1 Gbit/s can be transferred directly and reliably.«

Rüdiger Quay, who has been researching amplifiers for mobile base stations since 2002.

»5G-Mobilfunkstandard 2020? Dafür braucht es eine grundlegende Steigerung der Bandbreite durch Nutzung neuer Frequenzbänder. Die Datenraten werden weiter stark steigen, gleichzeitig müssen Latenzzzeiten, technisch bedingte Verzögerungszeiten, stark reduziert werden. Das macht nicht nur die private Nutzung komfortabler, sondern ist insbesondere für die direkte Kommunikation von Maschinen interessant, wo selbst Millisekunden der Verzögerung Produktionsprozesse stören. Dafür entwickeln wir neue Verstärker, die 5G, UMTS und LTE parallel für die Kommunikation mit der Basisstation nutzen, sodass in zukünftigen 5G-Netzen Datenmengen von 1 Gbit/s direkt und zuverlässig übertragen werden können.«

Rüdiger Quay, der seit 2002 an Verstärkern für Mobilfunk-Basisstationen forscht.



POWER ELECTRONICS

LEISTUNGSELEKTRONIK



Rüdiger Quay

Head of Business Unit »Power Electronics«



- Studies: Physics and economics**
- PhD and habilitation: Electrical engineering**
- Fraunhofer IAF staff member: since 2001**
- Focus of research: Radio frequency amplifiers and converters**

Mr. Quay, with the beginning of this year you're in charge of the business unit »Power Electronics«. What will the future bring for you?

Apart from content-related management, I am especially involved in the evaluation of the various interesting technological possibilities which have to be put into use after their implementation. To finally hold in my hands the working modules and transistors, which can be put to use by our partners, has always been what I particularly enjoy about this job. A concrete example of this could be the satellite communication in the range of 6 to 8 GHz or the next, improved generation of our jammer. In any case, there are a number of great ideas waiting to be implemented.

Where do you see the focal points of the business area »Power Electronics«?

The main focus certainly lies on the power generation for the high frequency range from 1 MHz to at least 100 GHz. But the fast and efficient converting of energy is also becoming more and more important. The current keywords in this field are: kilowatt-transistors, integrated circuits up to at least 100 GHz, but also new topics such as control engineering – and the associated system supply for and with our partners.

With regard to »building bridges«, where has your business unit so far succeeded particularly well in transferring technologies into areas of application?

The most prominent success surely are our amplifier modules for base stations. At first for UMTS and 2 ½ G. This initial phase required fundamental research before we took it to development more and more. Today, our gallium nitride amplifiers have been put into use in real base stations, especially for new technologies such as LTE. This »bridge« therefore already exists, but it will evolve. We need to become more efficient because of the strong data rates growth. Thus, we are developing together with Nokia, among others, innovative base-station-amplifiers, which meet the demands for 5G and can transfer up to 1 Gbit/s to mobile phones.

What are the challenges for the future?

In general, it will increasingly be about higher frequencies, e. g. 3 to 6 GHz, or rather about high performance at high frequencies. Today we reach up to about 100 GHz, in the future it should be 300 GHz because we need a lot of power to steadily transfer data over long distances at high frequencies. In practical terms, this means additional radio links, for instance, in order to close the gaps in broadband internet in rural areas. But this also means that radar technologies can see farther or that drones can fly higher.

Herr Quay, Sie haben zum Jahresbeginn die Leitung des Geschäftsfelds »Leistungselektronik« übernommen. Was kommt da auf Sie zu?

Neben der inhaltlichen Betreuung geht es für mich in der neuen Position vor allem darum, die vielen interessanten technologischen Möglichkeiten zu evaluieren und nach der Realisierung auch in die Verwertung zu bringen. Am Ende Module oder Transistoren in der Hand zu halten, die funktionieren und von unseren Partnern eingesetzt werden können – das ist für mich nach wie vor das Schöne an dieser Aufgabe. Konkret könnte das zum Beispiel die Satellitenkommunikation im Bereich von 6 bis 8 GHz sein, oder die nächste, verbesserte Generation unserer Störsender. Es gibt in jedem Fall viele gute Ideen, die auf die Umsetzung warten.

Wo sehen Sie die Schwerpunkte des Geschäftsfelds »Leistungselektronik«?

Der erste ist sicherlich die Leistungserzeugung für die Frequenzen von 1 MHz bis mindestens 100 GHz. Aber auch das schnelle effiziente Wandeln von Energie wird immer wichtiger. Aktuelle Schlagworte dazu wären: Kilowatt-Transistor, integrierte Schaltkreise bis mindestens 100 GHz, aber auch neue Gebiete wie die Regelungstechnik – und damit verbunden der Modulbau für und mit unseren Partnern.

Zum Thema Brückenbauen, wo ist Ihnen der Technologietransfer hin zum konkreten Einsatz bereits besonders gut gelungen?

Der prominenteste Erfolg sind sicherlich unsere Verstärkermodule für Basisstationen. Zunächst noch für UMTS und 2 ½ G – da bedurfte es anfangs noch wirklicher Grundlagenforschung bis es mehr und mehr in die Entwicklung ging und unsere Galliumnitrid-Verstärker heute in realen Basisstationen im Einsatz sind, insbesondere für neue Technologien wie LTE. Diese »Brücke« gibt es also schon, aber es wird noch weitergehen. Wir müssen viel effizienter werden, da die Datenraten stark steigen. Dafür entwickeln wir z. B. gemeinsam mit Nokia neuartige Basisstationenverstärker, die den Anforderungen von 5G gerecht werden und bis zu 1 Gbit/s auf das Handy übertragen können.

Was folgt noch in der Zukunft?

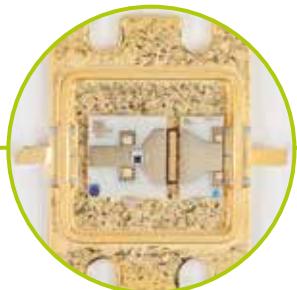
Generell wird es um höhere Frequenzen gehen, wie 3 bis 6 GHz, beziehungsweise um hohe Leistungen bei hohen Frequenzen. Heute geht es bis ca. 100 GHz, zukünftig sollen es 300 GHz werden. Wir brauchen viel Leistung, um bei hohen Frequenzen Daten über weite Strecken stabil zu senden. Das heißt konkret: Richtfunkstrecken mit größerer Reichweite, um beispielsweise Lücken in der Versorgung mit Breitband-Internet im ländlichen Raum zu schließen, aber auch, dass Radartechnologien weiter sehen und Drohnen höher fliegen können.

GaN-BASED TRANSISTORS FOR MOBILE COMMUNICATION

GaN-BASIERTE TRANSISTOREN FÜR DIE MOBILKOMMUNIKATION

MICHAEL DAMMANN
michael.dammann@iaf.fraunhofer.de

Gallium nitride power bar



- Output power: 100 W at 2 GHz
- Drain efficiency: 80 % at 2 GHz
- Frequency range: DC to 100 GHz
- Technology: 0.25 µm GaN-on-SiC



The progress in reliability in terms of high temperature and high voltage operation allows to use the outstanding physical properties of GaN-based high electron mobility transistors for high efficient power devices and to expand the frequency range. This will increase bandwidth and power density of the next generation of radio frequency power devices used in wireless communication systems.

For the use in wireless applications cost-effective, high-performance and reliable devices are required to replace the standard silicon technology. Since 2006 Fraunhofer IAF works in close collaboration with NXP Semiconductors on the development of power bars and switch mode amplifier designs to improve efficiency and power density in the 0.5 to 4.7 GHz range. For this purpose a special GaN on SiC technology with 0.25 µm gate length (GaN25) has been developed. Although GaN high electron mobility transistors (HEMTs) for radio frequency (RF) power applications have been commercially available for a couple of years and allow to fabricate smaller and more powerful transmitters, their commercialization in mobile communication systems is still hindered by cost and reliability issues.

Improved reliability of GaN power devices

In the last years the improvement in reliability of the GaN25 technology has been the main focus of investigation at Fraunhofer IAF. The reliability in on-state and off-state



1 The increasing data rate in mobile communication requires base stations with high efficient power devices and high bandwidth.

Aufgrund der steigenden

Datenraten werden Mobilfunk-Basisstationen mit breitbandigen, energieeffizienten Leistungsverstärkern benötigt.

Die Verbesserung der Zuverlässigkeit von GaN-basierten Transistoren auch bei hoher Temperatur und hoher elektrischer Spannung erlaubt es, die herausragenden physikalischen Eigenschaften der GaN-Transistoren für hocheffiziente Leistungsbauelemente mit erweitertem Frequenzbereich zu nutzen. Dies wird die Bandweite und Leistungsdichte der nächsten Generation von Hochfrequenz-Leistungsbauelementen für Anwendungen in der Mobilkommunikation erhöhen.

Für den Einsatz in der Mobilkommunikation werden kostengünstige und zuverlässige Bauelemente hoher Leistungsfähigkeit benötigt. Diese werden die standardmäßige Silizium-Technologie ablösen. Seit 2006 arbeitet das Fraunhofer IAF in Zusammenarbeit mit NXP Semiconductors an der Entwicklung von Designs für Leistungsbarren und Schaltverstärkern, um die Effizienz und die Leistungsdichte im Frequenzbereich von 0,5 bis 4,7 GHz zu verbessern. Zu diesem Zweck ist eine spezielle GaN-auf-SiC-Technologie mit einer Gatelänge von 0,25 µm (GaN25) entwickelt worden. Obwohl GaN-»High Electron Mobility Transistors« (HEMTs) für Leistungsanwendungen im Hochfrequenzbereich seit ein paar Jahren kommerziell erhältlich sind und die Herstellung von kleineren und leistungsstärkeren Funksendern erlaubt, ist ihre Kommerzialisierung in der Mobilkommunikation durch hohe Kosten und Zuverlässigsprobleme erschwert.

Verbesserte Zuverlässigkeit von GaN-Leistungsbauelementen

In den letzten Jahren wurde am Fraunhofer IAF der Schwerpunkt der Untersuchungen auf die Verbesserung der Zuverlässigkeit der GaN25-Technologie gelegt. Die Zuverlässigkeit unter Durchlass- und Ausschaltbedingungen ist durch beschleunigte Alterungstests der Transistoren untersucht worden. Auch eine physikalische Fehleranalyse mit Elektrolumineszenz und Transmissionselektronenmikroskopie des Querschnitts der degradierten Bauelemente war Teil der Untersuchung. Wir haben die Ursache der Degradation identifiziert und den Einfluss von Prozessänderungen zur Verbesserung der Langzeitstabilität von Transistoren analysiert. Auf diese Weise wurde die optimale Prozesstechnologie im Basisprozess implementiert. Durch Alterungstests mit angelegter Gleichspannung bei drei verschiedenen Temperaturen wurde eine extrapolierte Lebensdauer von 800.000 Stunden bei einer Kanaltemperatur von 150 °C bestimmt.

8 x 10⁵ h

**LIFETIME /
LEBENSDAUER**

The extrapolated life time under DC stress conditions at 150 °C is 8 x 10⁵ h.

Die extrapolierte Lebensdauer unter DC-Alterungsbedingungen bei 150 °C beträgt 8 x 10⁵ h.

Der größte Fortschritt in der Zuverlässigkeit unter Durchlassbedingungen wurde durch Verkleinerung der intrinsischen Spannung in der Passivierung erreicht. Die Spannungsfestigkeit unter Ausschaltbedingungen konnte durch Änderungen des Gate-Modul-Prozesses erhöht werden. Eine sehr gute Reproduzierbarkeit des Herstellungsprozesses bezüglich Hochfrequenz-Leistungsfähigkeit und Ausbeute haben wir durch Fertigung von vielen Bauelementen mit identischer Prozesstechnologie erreicht. Die zukünftige Arbeit beinhaltet eine weitere Verbesserung der Zuverlässigkeit und die Untersuchung von Bauelementen mit einer kürzeren Gatelänge von 100 nm.

conditions has been investigated by stressing the transistors under accelerated test conditions. Degraded devices have been investigated by physical failure analysis using electroluminescence and transmission electron microscopy cross sectioning. The root causes of degradation have been identified and the effect of process variations aiming to increase long term stability has been analysed in experimental runs. This way the optimum processing technology has been implemented in the base line process. An extrapolated lifetime of 800.000 h at 150 °C channel temperature under DC operation conditions has been determined using DC-biased stress tests at three different temperatures.

technology. These GaN-based power devices have a clear RF performance advantage in terms of efficiency, bandwidth, and power density compared to standard silicon devices. By utilizing in-house packaging capabilities, a wideband pre-matched amplifier cell incorporating a 100 W GaN power bar as well as passive package-integrated circuitry was developed. The packaged transistors can be conveniently used as basis for designing highly efficient high power amplifiers. Two reference amplifier designs representing the carrier and peaking amplifier cells for intended use in a Doherty configuration suitable for Long Term Evolution (LTE) applications show power-added efficiency of more than 50 % over a frequency range from

»GaN HEMT power devices will pave the way to more efficient and faster power devices for wireless communication without reliability penalty.«

Michael Dammann, group »Characterization«.

The major progress in reliability under on-state conditions has been achieved by reducing the strain in the passivation. The voltage robustness in off-state conditions has been increased by changes of the gate module processing. Excellent batch to batch reproducibility in terms of RF performance and yield has been achieved by fabricating base line runs with identical process technology. In future work the reliability will be further improved and devices with a shorter gate length of 100 nm will be investigated.

RF performance with increased efficiency, bandwidth, and power density

Using the 0.25 µm GaN HEMT base line technology the drain efficiency of 100 W power bars at 2 GHz has been increased from 70 % to 80 % compared to the 0.5 µm gate length

2.6 GHz to 3.0 GHz while delivering more than 80 W of RF output power.

Fraunhofer IAF offers GaN technologies using a gate length of 0.1 µm, 0.25 µm and 0.5 µm to realize highly-efficient and reliable power transistors and integrated circuits from DC up to 100 GHz. Important process modules for the fabrication of GaN HEMTs with 0.5 µm gate length have been successfully transferred to UMS and devices are commercially available now. It is intended to use the advantages of GaN-based power transistors in the next generation of cellular networks which have to be operated at higher bandwidth to achieve higher data rates.



2

2 High efficiency GaN HEMT amplifier circuits for Long Term Evolution (LTE) applications.

Hocheffiziente GaN-HEMT-Verstärker für Long-Term-Evolution (LTE)-Anwendungen.

GaN-basierte Transistoren mit erhöhter Effizienz, Bandbreite und Leistungsdichte

Die Drain-Effizienz von 100 W Leistungsbarren der 0,25 µm GaN-HEMT-Basistechnologie wurde im Vergleich zur 0,5 µm Gatelängen-Technologie von 70 % auf 80 % bei 2 GHz erhöht. Diese GaN-basierten Leistungsbauelemente haben einen deutlichen Vorteil für Hochfrequenzanwendungen bezüglich Effizienz, Bandbreite und Leistungsdichte im Vergleich zu Standard-Silizium-Bauelementen. Durch Nutzung der hausinternen Ressourcen in der Aufbautechnik wurde eine angepasste Verstärkerzelle entwickelt, die einen 100 W GaN-Leistungsbarren sowie eine passiv integrierte Schaltung beinhaltet. Diese aufgebauten Transistoren können in geeigneter Weise als Basis für die Auslegung hocheffizienter Leistungsverstärker genutzt werden. Zwei Referenzverstärker-Designs, die den Träger und Spitzenverstärker in einer Doherty-Konfiguration für Long-Term-Evolution-Anwendungen repräsentieren, erzielten eine Effizienz von mehr als 50 % über einen Frequenzbereich von 2,6 GHz bis 3,0 GHz, wobei sie eine Ausgangsleistung von 80 W lieferten.

Das Fraunhofer IAF bietet GaN-Technologien mit einer Gatelänge von 0,1 µm, 0,25 µm und 0,5 µm an, um hocheffiziente und zuverlässige Leistungstransistoren und integrierte Schaltungen von Gleichspannung bis zu Frequenzen von 100 GHz zu realisieren. Wichtige Prozess-Module für die Herstellung von GaN-HEMTs mit einer Gatelänge von 0,5 µm wurden erfolgreich an UMS transferiert und Bauelemente kommerzialisiert. Es ist unser Ziel, die Vorteile von GaN-basierten Transistoren für die nächste Mobilfunkgeneration zu nutzen und damit höhere Datenraten mit größerer Bandweite zu erreichen.

80 %

**DRAIN
EFFICIENCY /
DRAIN-EFFIZIENZ**

***The ratio of output
RF power to input
DC power of GaN ampli-
fiers is 80 % at 2 GHz.***

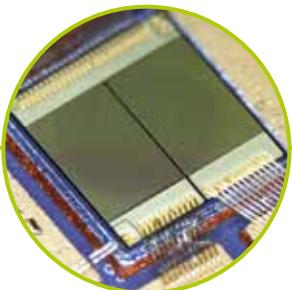
***Das Verhältnis von
RF-Ausgangsleistung
zu DC-Eingangsleistung
von GaN-Verstärkern
beträgt 80 % bei 2 GHz.***

GALLIUM NITRIDE – MORE THAN POWER

GALLIUMNITRID – MEHR ALS LEISTUNG

RICHARD REINER
richard.reiner@iaf.fraunhofer.de

Full-monolithic integrated half bridge



- Low inductive, fully-integrated half bridge power chip for high power density converter applications
- High area-efficiency: $2 \times 600 \text{ V} / 100 \text{ m}\Omega$ on $4 \times 4 \text{ mm}^2$
- Highest switching speed by low gate charges and reverse recovery charges



Electromobility requires a new generation of power electronic devices. Such technological challenges are enabled by high performance semiconductor technologies. Based on our innovative gallium nitride technology the Fraunhofer IAF demonstrates highly integrated devices with high power performance, excellent switching speed and new functionality. These properties are demonstrated by our highly compact half bridge module and our fully integrated multilevel converter on chip.

The growing importance of electromobility requires significant technological changes. Power electronics, which is said to be »the gear of the future«, will play a key role for power applications in electric cars. The development leaps will be enabled by new powerful semiconductor technologies, such as gallium nitride (GaN) on inexpensive, large diameter silicon substrates. Due to the outstanding physical properties, GaN-based power electronics systems can be more compact, more robust and less expensive. Fraunhofer IAF has recognized the potential of this technology in early years. Our institute provides extensive expertise in the full range of this field, beginning from material science, process technology, chip design, and characterization up to the development of power electronic demonstrators.



1 *GaN-technology leads to high efficient, low weight, and high compact converters for power applications in electric cars.*

Die GaN-Technologie führt zu hoch effizienten, leichten und sehr kompakten Spannungs-wandlern für Leistungsanwen-dungen in der Elektromobilität.

600 V

**OFF-STATE
VOLTAGE /
SPERRSPANNUNG**

Half-bridge with integrated reverse diodes for off-state-voltages of more than 600 V.

Halbbrücke mit integrierten Rücklaufdioden für Sperrspannungen von mehr als 600 V.

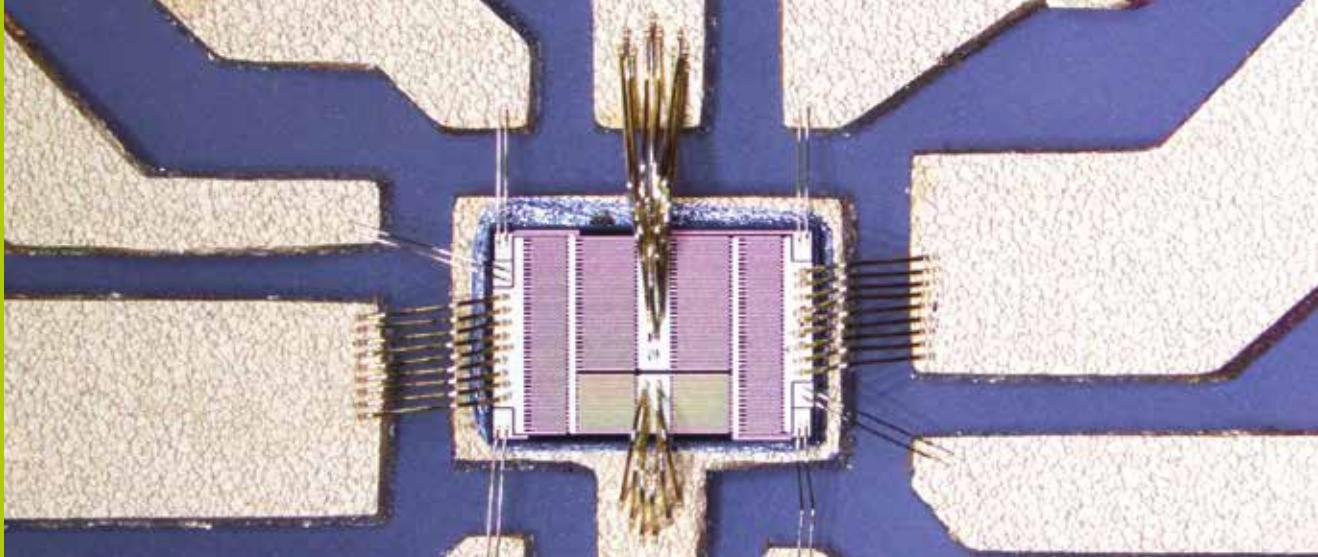
Um die Verbreitung von Elektromobilität voranzutreiben, werden fortschrittliche leistungselektronische Bauelemente benötigt. Die hohen technologischen Herausfor-derungen werden durch neuartige Halbleitertechnologien ermöglicht. Basierend auf einer innovativen GaN-Technologie entwickelt das Fraunhofer IAF hochintegrierte Bauelemente mit hoher Leistungsfähigkeit, schneller Schaltgeschwindigkeit und hoher Funktionalität. Diese Eigenschaften werden durch einen kompakten Halb-brückenbaustein und einen voll-monolithisch integrierten Multilevel-Wandler-Schaltkreis demonstriert.

Die wachsende Bedeutung der elektrischen Mobilität erfordert signifikante technologische Fortschritte. Die Leistungselektronik spielt als »das Getriebe der Zukunft« eine zentrale Rolle in Elektrofahrzeugen und für ihre Weiterentwicklung. Diese wird durch moderne leistungsfähige Halbleiter-Technologien wie Galliumnitrid (GaN) auf kostengünstigen, großflächigen Silizium-Substraten ermöglicht. Durch die herausragenden physikalischen Eigenschaften von GaN können leistungselektronische Systeme kleiner, robuster und kostengünstiger hergestellt werden. Das Fraunhofer IAF hat das Potenzial dieser Technologie bereits vor Jahren erkannt. Das Institut besitzt die Fachkompetenz in allen Bereichen der GaN-Forschung, angefangen von der Materialwissenschaft, über die Prozess-Technologie, den Schaltungsentwurf, die Charakteri-sierung bis hin zu der Entwicklung von leistungselektronischen Systemen.

Größere Funktionalität und höhere Leistung durch laterale GaN-Technologie

Die Bausteine der konventionellen Leistungselektronik sind Bauelemente, wie Power-MOSFETs, IGBTs oder Leistungs-Dioden. Dagegen ermöglicht die laterale Heterostruktur-Feldeffekt-GaN-Technologie eine viel höhere Funktionalität, da mehrere GaN-Schaltungskomponenten nebeneinander angeordnet werden können. Damit können komplett Topologien oder ganze Schaltungsteile auf einem Leistungs-Chip integriert werden. Solch hochintegrierte Ein-Chip-Lösungen erreichen ein besseres Schaltverhalten durch eine verlustarme Verbindung und einen reduzierten Aufwand für Verdrahtungstechnologien. Das Fraunhofer IAF kann dadurch ideale kundenspezifische Lösungen für eine Vielzahl von Leistungsanwendungen anbieten.

Die Vorteile dieser hochintegrierten Lösungen demonstrieren wir in aktuellen Arbeiten: Das Kernstück vieler Spannungswandler-Anwendungen ist eine Halbbrückenschaltung, beste-hend aus zwei Transistoren und zwei Dioden. Das Fraunhofer IAF hat einen voll-monolithisch



2

Higher functionality and higher performance by lateral GaN technology

The building blocks of the conventional power electronics are single devices, as power MOSFETs, IGBTs, or diodes. In contrast to that, the lateral heterojunction field effect GaN technology enables a much higher functionality, because GaN devices can be placed monolithically side by side on a single chip. Thus, complete power topologies or circuits can be realized on single power chips.

Such highly integrated one-chip solutions feature an improved performance due to lower parasitics and the reduced need for interconnections and assembly technologies. In this manner our institute provides customized solutions in our advanced high voltage GaN-on-Si technology for various power applications.

»The lateral GaN technology combines high functionality with high power performance. Therefore, it is the coming technology for the next generation of power electronics.«

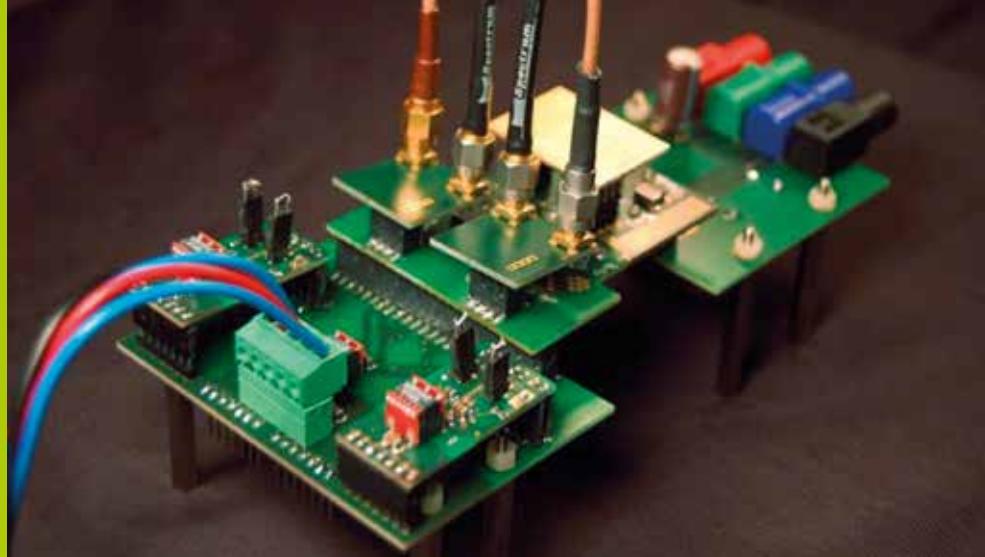
transistors and six diodes on a single $2 \times 3 \text{ mm}^2$ chip. It is the perfect solution for compact DC/AC inverter applications. Furthermore, we have developed GaN power HEMTs with integrated driver-stage. Highest switching rates are achieved with a value of 240 V/ns for turn-on as well as turn-off. These components demonstrate low dynamic losses at very high frequencies.

The process technology is the key of success

The fundamentals of high performance GaN devices are a high quality material and a sophisticated process technology. Our high voltage GaN-on-Si device technology is based on the heteroepitaxial growth of III-nitride layers by metal-organic chemical vapor deposition.

We have recently demonstrated the advantages of such highly integrated solutions. The core topology in most converter applications is a half bridge circuit, which consists of two transistors and two diodes. Fraunhofer IAF has developed a full-monolithic integrated half bridge chip for compact voltage converters, as required in automotive power applications. This chip includes a new improved GaN HEMT structure with integrated freewheeling Schottky contacts. Thus, in this approach the functionality of a transistor and a diode are merged together to achieve the highest performance in the on-state just as well as in the reverse-state. A further level of integration has been shown with our full-monolithic integrated multilevel converter chip (Fig. 2). It includes 10 power components, four

The high resistive epitaxial GaN buffers are grown on 4" and 8" Si substrates. These structures feature high isolation and low defect density in order to reach high breakdown voltages beyond 1000 V. Based on this material high voltage devices are fabricated in our III-V processing line. The technology is developed to meet the high requirements of high voltage devices with high static power performance and excellent dynamic switching behavior. With these ingredients our power GaN devices achieve high on-state currents up to 100 A_{PLS}, low on-states resistances down to 50 mΩ, and low leakage currents in the off-state at 600 V of below 100 nA/mm. Thus, we provide the perfect GaN technology for the next generation of high compact, high performance power applications.



3

2 Monolithic integrated multilevel converter for 600 V class power applications.

Monolithisch integrierter Multilevel-Konverter für Leistungsanwendungen der 600 V Klasse.

3 Demonstrator board of a multilevel converter.

Demonstrationsaufbau eines Multilevel-Konverters.

integrierten Halbrücken-Chip entwickelt. Dieser eignet sich bestens für den Einsatz in kompakten Spannungswandlern in der Automobilindustrie. Dabei beinhaltet der Chip eine neue, erweiterte GaN-HEMT-Struktur mit integrierten Freilauf-Schottky-Dioden. Damit vereint diese Lösung die Funktionalität von Transistoren und Dioden und erreicht höchste Effizienz sowohl im Vorwärts- als auch im Rückwärtsbetrieb.

Eine weitere Stufe der Integration haben wir an unserem voll-monolithischen Multilevel-Wandler gezeigt (Fig. 2). Der Schaltkreis auf einer Fläche von $2 \times 3 \text{ mm}^2$ beinhaltet 10 Leistungsschalter, 4 Transistoren und 6 Dioden. Damit ist er eine perfekte Lösung für kompakte DC/AC-Inverter-Anwendungen. Hohe Schaltflanken erreichen wir an einem Leistungstransistor mit einer integrierten Treiberstufe. Damit werden beim Ein- und Ausschalten höchste Schaltgeschwindigkeiten mit Werten von 240 V/ns erreicht. Diese Schalteinheit demonstriert damit sehr kleine dynamische Verluste bei sehr hohen Frequenzen.

Die Prozess-Technologie als Schlüssel des Erfolgs

Voraussetzung für die Fertigung von leistungsfähigen GaN-Bauelementen sind eine hohe Materialqualität und eine geeignete Prozess-Technologie. Unsere Hochvolt-GaN-auf-Si-Technologie basiert auf dem heteroepitaktischen Wachstum von Gruppe-III-Nitriden mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie. Dabei werden die sehr hochohmigen GaN-Epitaxieschichten auf 4" und 8" Si-Substraten gewachsen. Die Strukturen haben kleine Defektdichten sowie eine hohe Isolation und erreichen Sperrspannungen von bis zu 1000 V. Auf Basis dieses Materials werden die Leistungshalbleiterbauelemente in unserer III-V-Prozesstechnologie realisiert. Die Technologie erfüllt höchste Anforderungen sowohl in Bezug auf statische Eigenschaften als auch auf das dynamische Verhalten. Unsere Bauelemente erreichen Durchlassströme bis zu $100 \text{ A}_{\text{PLS}}$, niedrige Durchlasswiderstände von unter 50 mΩ und kleine Leckströme im Sperrzustand bei 600 V von unter 100 nA/mm. Damit ist diese GaN-Technologie perfekt für die künftige Generation von hochkompakten und hocheffizienten Leistungsanwendungen geeignet.

2 × 100 mΩ
ON-STATE
RESISTANCES /
DURCHLASS-
WIDERSTÄNDE

Power chip with on-

state-resistances of

2 × 100 mΩ on an area
of $4 \times 4 \text{ mm}^2$.

Leistungchip mit Durchlasswiderständen von 2 × 100 mΩ auf einer Fläche von $4 \times 4 \text{ mm}^2$.

GaN-BASED CIRCUITS FOR W-BAND HIGH POWER APPLICATIONS

GaN-BASIERTE SCHALTUNGEN FÜR W-BAND-LEISTUNGSANWENDUNGEN

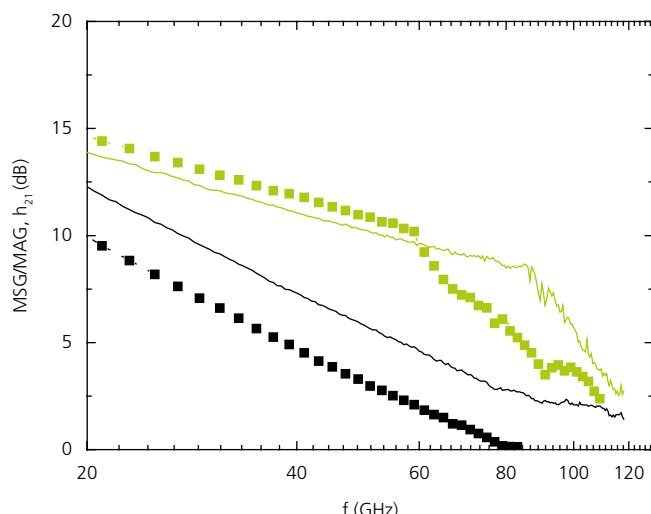
DIRK SCHWANTUSCHKE
dirk.schwantuschke@iaf.fraunhofer.de

The links of 5th generation mobile communication and new radars are enabled by novel integrated circuits. We present here a 100 nm GaN technology to increase the transit frequencies and the power levels of power amplifiers. Low sheet resistance of the transistors of less than 300 Ω/sq has been achieved. Furthermore, low ohmic contacts with access resistance of less than $0.3 \times 10^{-3} \Omega\text{m}$ have been developed. Along with a reduction of the parasitic losses, the transit frequency of the 100 nm technology has recently been increased up to 100 GHz. Our GaN power amplifier monolithic microwave integrated circuit demonstrates a high saturated output power of more than 29 dBm (800 mW) and an associated power density of 1.4 W/mm at 97 GHz.

GaN-based radio-frequency power amplifiers are known to outperform comparable integrated circuit technologies in terms of saturated output power, power density, and efficiency up to K-band frequencies (i. e. 20 GHz). One current focus of Fraunhofer IAF is to push the frequency limitations of the GaN circuits to 100 GHz and beyond. In future radar systems, a higher operating frequency will result in an enhancement of the achievable spatial resolution and accuracy in a compact fashion, suitable e. g. for unmanned aerial vehicle (UAV) applications. At the same time, a high bandwidth also improves the maximum data rate, which is important for the design of future wireless communication systems, e. g. for point-to-point data links. This includes both future 5G mobile communication applications as well as data links of UAVs and satellites. Critically, in both cases the operating range of such systems rises directly with their increasing output power levels. GaN-based solid-state power amplifiers are thus key components of modern radio frequency systems.

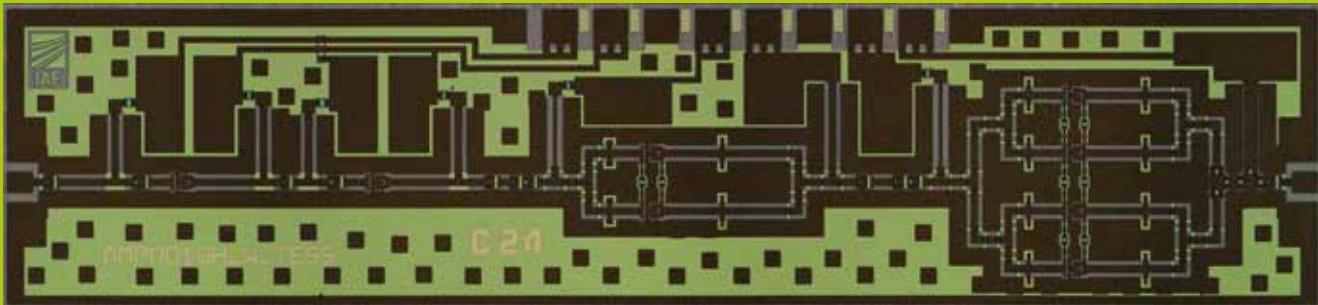
Scope of applications

Therefore, epitaxial structures, device processing technology, as well as IC technology have to be enhanced by increasing the transit frequency and the output power density to improve the monolithic microwave integrated circuit (MMIC) performance up to W-band (75 – 110 GHz) frequencies. This frequency range is of special interest for the next generation of high data rate satellite communication and high-resolution radar systems. To that end, an AlGaN/GaN high electron mobility transistor (HEMT) technology has been developed at Fraunhofer IAF on 4 inch SiC wafers and with a gate length of 100 nm. This technology already demonstrates a transit frequency f_T of above 80 GHz (Fig. 2), along with high reliability and an extrapolated lifetime of more than 10^5 h. This enables the realization of high-power amplifiers with a saturated output power of over 30 dBm and a corresponding power density of approximately 1 W/mm at the lower E-band (71 – 76 GHz).



1 Comparison of the current gain h_{21} , and the MSG/MAG versus frequency for the original (symbols) and the advanced GaN10 (lines) technology. $V_D = 15 \text{ V}$, $I_D = 300 \text{ A/mm}$, $W_G = 4 \times 45 \mu\text{m}$

Vergleich der Stromverstärkung h_{21} , und der MSG/MAG Charakteristik über der Frequenz für die Ausgangstechnologie (Symbole) und die weiterentwickelte GaN10-Technologie (Linien). $V_D = 15 \text{ V}$, $I_D = 300 \text{ A/mm}$, $W_G = 4 \times 45 \mu\text{m}$



2

2 Four-stage GaN power amplifier circuit for W-band applications.

Vierstufige GaN-Leistungsverstärker-Schaltung für W-Band-Anwendungen.

Neuartige integrierte Schaltungen ermöglichen die Realisierung von Radarsystemen und Mobilfunksystemen der 5. Generation. Mit der 100 nm GaN-Technologie des Fraunhofer IAF lassen sich die Transitfrequenz und die Ausgangsleistung von Verstärkern erhöhen. Dabei wurde ein niedriger Kanalwiderstand der Transistoren von $300 \Omega/\text{sq}$ erreicht und niederohmige Kontaktwiderstände mit weniger als $3 \times 10^{-4} \Omega\text{m}$ entwickelt. Durch die gezielte Reduktion der parasitären Verluste konnte die Transitfrequenz auf über 100 GHz erhöht werden. Die realisierten GaN-Leistungsverstärker zeigen eine hohe Ausgangsleistung von über 29 dBm (800 mW) bei 97 GHz, zusammen mit einer hohen Leistungsdichte von 1,4 W/mm.

GaN-basierte Hochfrequenz-Leistungsverstärker zeigen bereits heute bis zu einer Frequenz von 20 GHz deutlich höhere Ausgangsleistungen, Leistungsdichten und Wirkungsgrade im Vergleich zu anderen Halbleiter-Technologien. Ein Ziel des Fraunhofer IAF ist es, die aktuelle Frequenzlimitierung solcher GaN-Schaltkreise auf über 100 GHz zu erhöhen. Denn für zukünftige Radarsysteme ermöglicht eine höhere Betriebsfrequenz die Realisierung von sehr hohen spektralen Auflösungen bei gleichzeitig sehr kompakter Bauweise, was besonders für die Ausrüstung von unbemannten Luftfahrzeugen von Vorteil ist. Bei Richtfunk-Übertragungsstrecken ermöglicht eine höhere Betriebsfrequenz die Realisierung von sehr hohen Bandbreiten, was gleichzeitig die Datenrate solcher Systeme erhöht. In beiden Fällen ist dabei die maximale Reichweite dieser Systeme durch die zur Verfügung stehende Ausgangsleistung limitiert. Dies macht solche GaN-basierten Leistungsverstärker zu Schlüsselementen von modernen Hochfrequenzsystemen.

Anwendungsspektrum

Die Erhöhung der Leistungsfähigkeit monolithisch integrierter Mikrowellenschaltungen im W-Band (75 – 100 GHz) erfordert die Weiterentwicklung der epitaktischen Strukturen, der Bauteil-Prozessierung und der Technologie an sich, um die Transitfrequenz und die Leistungsdichte zu erhöhen. Besonders das W-Band ist dabei von großem Interesse, um für zukünftige Satellitenkommunikationssysteme hohe Datenraten zu ermöglichen oder hochauflösende Radarsysteme zu demonstrieren. Dazu wurde am Fraunhofer IAF eine 4"-AlGaN/GaN-HEMT-Technologie mit einer Gatelänge von 100 nm entwickelt. Für diese Technologie konnte eine Transitfrequenz f_T von 80 GHz, zusammen mit einer hohen Lebensdauer von über 10^5 Stunden demonstriert werden. Dies ermöglicht bereits die Realisierung von Leistungsverstärkern mit hohen Ausgangsleistungen von mehr als 30 dBm (1 W), bei gleichzeitig hohen Leistungsdichten von über 1 W/mm für das untere E-Band (71 – 76 GHz).

Epitaxy and technology

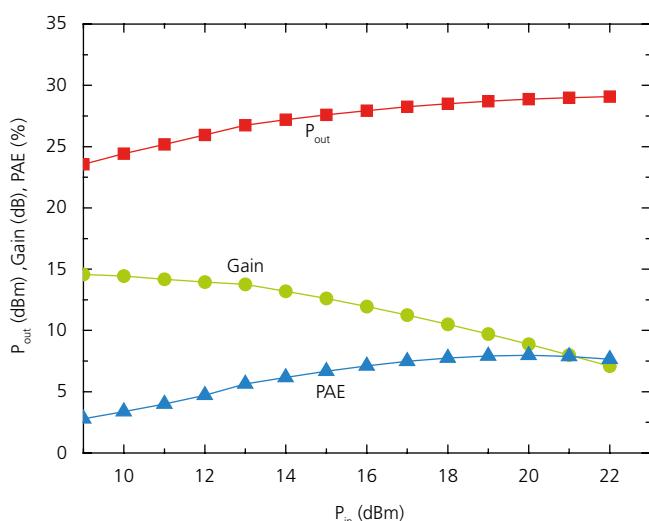
From the perspective of the epitaxial structures, the reduction of the sheet resistance is one of the most challenging targets together with the wafer homogeneity and device reliability. One approach is the development of advanced AlGaN barrier structures containing a thin AlN interlayer next to the GaN channel. Due to the AlN interlayer, the sheet resistance of the epitaxial structures can be reduced to a target value below $300 \Omega/\text{sq}$. This significant reduction of the ohmic losses directly results in a higher drain current density of the transistors. This fact improves the maximum power density and further enhances the signal gain of the active devices.

The device processing also requires further development to increase the high-frequency performance. For example, in order to take advantage of the enhanced epitaxial structures it is necessary to achieve low-resistive ohmic contacts to

reduce the access losses. Therefore, we have developed low-resistive ohmic contacts based on Si implantation. As a result, we were able to measure a very low contact resistance of $3 \times 10^{-4} \Omega\text{m}$ for the advanced GaN10 process. Furthermore, the reduction of parasitic capacitive losses of the active devices is within the focus of our research. This is possible by carefully designing the passivation area of the FETs for low capacitance.

Device and circuit

The optimized 100 nm GaN technology leads to an improved gain performance at high frequencies, which is illustrated by the comparison of the MSG/MAG characteristic and the current gain h_{21} for the advanced and the 100 nm GaN technology (Fig. 2). The comparison directly indicates the higher current gain h_{21} of the advanced transistor devices, which results in a high transit frequency of over 100 GHz. Also, the MSG/MAG characteristic forecasts a higher cut-off frequency, which allows the realization of common-source power amplifiers up to W-band frequencies. Such a power amplifier based on the advanced 100 nm technology has been designed and fabricated. The chip photograph of this four-stage power amplifier is given in Fig. 1. It is one of the first European GaN MMICs based on common-source devices in this frequency range. The measured large-signal characteristics of the MMIC are given in Fig. 3 for an applied drain voltage of 14 V and continuous-wave (CW) operation. The amplifier demonstrates a high saturated output power of over 29 dBm (800 mW) at 97 GHz. Along with a total transistor gate width of 0.56 mm at the amplifier output stage, this results in a very high power density of above 1.4 W/mm. Furthermore, a linear gain of 15 dB and a power added efficiency (PAE) of above 7 % were measured. These results indicate the great potential of the novel 100 nm GaN technology to enhance the performance of future wireless communication and radar systems also at W-band frequencies.



3 Continuous wave large-signal measurement of the 4 stage

W-band power amplifier at 97 GHz.

97 GHz Großsignal-Messung des vierstufigen W-Band-Leistungsverstärkers.

Epitaxie und Technologie

Aus materialwissenschaftlicher Sicht ist die Reduktion des Schichtwiderstands, bei gleichzeitig hoher Wafer-Homogenität und Bauteil-Zuverlässigkeit, eine der größten Herausforderungen. Ein Ansatz ist die Entwicklung einer AlGaN-Barriere mit einer dünnen AlN-Schicht an der Schnittstelle zum GaN-Kanal des Transistors. Mit Hilfe dieser Struktur lässt sich der Kanalwiderstand auf unter $300 \Omega/\text{sq}$ reduzieren. Durch diese Reduktion der ohmschen Verluste erhöht sich die maximale Stromdichte der Transistoren. Dies erhöht nicht nur die maximale Leistungsdichte der Transistoren sondern verbessert gleichermaßen die Signalverstärkung der Bauelemente. Die Bauteil-Prozessierung muss ebenfalls weiterentwickelt werden, um die Leistungsfähigkeit der Bauelemente für hohe Frequenzen zu erhöhen. Um beispielweise die verbesserten epitaktischen Strukturen zu nutzen, ist die Entwicklung von niederohmigen Kontakten erforderlich. Aus diesem Grund wurden für die 100 nm GaN-Technologie Source- und Drain-Kontakte mithilfe einer Si-Implantation mit einem Kontaktwiderstand von unter $3 \times 10^{-4} \Omega\text{m}$ entwickelt. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Reduzierung der parasitären Verluste innerhalb der aktiven Bauelemente, welche durch eine gezielte Verbesserung der Transistor-Passivierung minimiert werden konnten.

Bauteil und Schaltung

Diese Entwicklungen führen zu einer verbesserten Leistungsfähigkeit der 100 nm GaN-Technologie bei sehr hohen Frequenzen, was sich am besten durch den direkten Vergleich der MSG/MAG-Charakteristik sowie der Stromverstärkung h_{21} für die Ausgangstechnologie und ihre weiterentwickelte Variante verdeutlichen lässt (Abb. 2). Im Vergleich zeigen die weiterentwickelten Transistoren eine deutlich erhöhte Stromverstärkung über der Frequenz, was eine Erhöhung der Transitfrequenz auf über 100 GHz zur Folge hat. Die ebenfalls verbesserte MSG/MAG-Charakteristik sagt eine höhere maximale Betriebsfrequenz der Transistoren voraus, welche die Realisierung von Leistungsverstärkern im W-Band ermöglicht. Solch ein Leistungsverstärker wurde mit Hilfe der weiterentwickelten 100 nm Technologie entworfen und prozessiert. Abb. 1 zeigt einen derartigen vierstufigen Leistungsverstärker. Dieser ist gleichzeitig der erste GaN-basierte monolithisch integrierte Entwurf in diesem Frequenzbereich in Europa, der auf Transistoren in Source-Schaltung beruht. Die gemessenen Großsignal-Charakteristika des Verstärkers sind in Abb. 3 für eine Versorgungsspannung von 14 V aufgetragen. Für diesen Verstärker konnte bei 97 GHz eine hohe Ausgangsleistung von über 29 dBm (800 mW) gemessen werden. In Bezug auf die gesamte Transistorweite in der Ausgangsstufe des Leistungsverstärkers resultiert dies in einer hohen Leistungsdichte von über 1,4 W/mm. Ebenfalls wurden eine Verstärkung von mehr als 15 dB und ein Wirkungsgrad von über 7 % gemessen. Diese Ergebnisse zeigen das große Potenzial der weiterentwickelten 100 nm GaN-Technologie, die Leistungsfähigkeit zukünftiger Funk- und Radarsysteme auch im W-Band weiter zu erhöhen.

PHOTODETECTORS

PHOTODETEKTOREN

ROBERT REHM
robert.rehm@iaf.fraunhofer.de

Bridging security gaps with infrared detectors

Mit Infrarot-Detektoren Sicherheitsrisiken überbrücken

»Technology for people? For rescue teams, we are currently developing a camera which operates in the long-wave infrared range and, contrary to the human eye, is able to see through smoke and fog. The farther we enter into the long-wave range, the easier can the emission of objects penetrate smoke and fog. In the short-wave infrared range, we have already realized cameras, which allow for a better penetration of the scene than conventional cameras consisting of silicon components.«

Robert Rehm, who is researching detectors for the long-wave infrared.

»Technik für den Menschen? Für Rettungseinsätze arbeiten wir aktuell an einer Kamera, die im langwelligen Infrarot arbeitet und damit, anders als das menschliche Auge, durch Rauch oder Nebel sehen kann. Denn je weiter wir in den langwirigen Bereich gehen, umso besser durchdringt die Eigenemission von Objekten Rauch und Nebel. Im kurzwelligen Infrarot haben wir bereits Kameras realisiert, die eine deutlich bessere Durchdringung der Szene erlauben als herkömmliche Kameras auf Basis von Silizium-Bauteilen.«

Robert Rehm, der an Detektoren für das langwellige Infrarot forscht.





PHOTODETECTORS

PHOTODETEKTOREN



Robert Rehm

Head of Business Unit »Photodetectors«



Studies: Physics

PhD: Physical modelling and electro-optical characterization of quantum film infrared detectors

Fraunhofer IAF staff member: since 1996

Focus of research: Type-II InAs/GaSb superlattices

Mr. Rehm, you have been at the institute for 20 years and are well acquainted with its history. Now you are taking over the management of the business unit »Photodetectors«, what will be new about this?

I have passed through various stations during my time at Fraunhofer IAF and therefore have a good overview of the different areas of the business unit. With this experience, I am now looking forward to shaping developments in the unit more actively than before. Scientifically speaking, I have been rooted in the field of infrared detectors so far, but I am now keen on increasing the cooperation with colleagues in the field of gallium-nitride-based UV detectors. Strategic tasks such as securing the funding of our unit or increasing our industrial revenues will make up an essential part of my new position.

Simply speaking, what does the unit »Photodetectors« do?

We are developing high-performance single component or line detectors as well as two dimensional detector matrices for the infrared and ultraviolet spectral ranges. These detectors are relevant for entirely different areas of application. These include security applications such as warning sensors for airplanes or the use for gas and environmental measurements such as the detection of methane in the atmosphere. In the future, we would like to expand our activities along the value chain in different areas in order to eventually make these technologies available to medium-sized companies.

Where has your business unit successfully built a bridge between research and application? Where have your technologies been employed already?

Our bispectral infrared detectors, which we have been developing in cooperation with Airbus Defense & Space and AIM for ten years, serve as a great example for this. These infrared detectors are used for military warning systems for airplanes which can detect approaching missiles, or rather their exhaust plumes, consisting of CO₂. Over the last decade, we have succeeded in developing the most effective technology available today in this area. But, naturally, we want to go farther.

What do you want to achieve with the unit »Photodetectors«?

Generally speaking, I want to increase the performance of our basic technologies: raising operating temperatures in order to achieve a higher spatial resolution and greater range, and increasing sensitivity. Additionally, we aim at expanding our capacities in the long-wave infrared range, even beyond 12 µm, as well as in the ultraviolet range. Thus, there will not be a revolution; instead the evolution needs to continue. This is the only way to secure the customer's loyalty and increase revenues in the long run.

Herr Rehm, Sie sind seit 20 Jahren am Institut, kennen damit die Historie gut – jetzt übernehmen Sie die Geschäftsfeldleitung, was kommt da Neues auf Sie zu?

Ich habe viele Stationen am Fraunhofer IAF durchlaufen und daher heute einen guten Überblick über die verschiedenen Bereiche des Geschäftsfelds. Mit diesen Erfahrungen im Rücken möchte ich jetzt die Entwicklung der Photodetektoren noch aktiver mitgestalten. Inhaltlich war ich bislang stark im Bereich der Infrarot-Detektoren verwurzelt, freue mich aber jetzt darauf, die Zusammenarbeit mit den Kollegen im Bereich der Galliumnitrid-basierten UV-Detektoren auszubauen. Auf strategischer Seite wird es als Geschäftsfeldleiter verstärkt darum gehen, die Finanzierung des Geschäftsfelds zu sichern und unsere Industrieerträge weiter zu steigern.

In einfachen Worten, was macht das Geschäftsfeld »Photodetektoren«?

Wir entwickeln sehr leistungsfähige Einzelement- oder Zeilendetektoren sowie zweidimensionale Detektormatrizen für die Spektralbereiche Infrarot und Ultraviolet. Diese sind für ganz unterschiedliche Anwendungen relevant. Zum Beispiel für Sicherheitsanwendungen wie Warnsensoriksysteme für Flugzeuge, oder für die Gas- und Umweltmesstechnik, wenn es darum geht, Methan in der Atmosphäre zu detektieren. Zukünftig wollen wir in den verschiedenen Bereichen die Wertschöpfungskette weiter ausbauen, um schließlich unsere Technologien in Form von Kleinserien auch mittelständischen Unternehmen zugänglich zu machen.

Wo ist denn für Ihr Geschäftsfeld schon eine erfolgreiche Brücke geschlagen, wo werden Technologien bereits heute eingesetzt?

Allem voran sind das unsere bispektralen Infrarot-Detektoren, die wir seit 10 Jahren gemeinsam mit Airbus Defense & Space und der AIM entwickeln. Die Infrarot-Detektoren werden für militärische Warnsysteme von Flugzeugen eingesetzt, die anfliegende Raketen bzw. deren Abgasfahne, sprich CO₂, detektieren. Hier ist es uns über das letzte Jahrzehnt gelungen, die derzeit leistungsfähigste Technologie zu schaffen. Doch wir wollen natürlich noch weiter.

Was möchten Sie denn mit dem Geschäftsfeld »Photodetektoren« erreichen?

Ganz allgemein natürlich die Leistungsfähigkeit unserer Basistechnologien steigern: also die Betriebstemperatur erhöhen und eine höhere räumliche Auflösung und größere Reichweite erzielen sowie die Sensitivität steigern. Außerdem wird es darum gehen, unsere Fähigkeiten im langwelligen Infrarot, auch jenseits der 12 µm, genauso wie im ultravioletten Bereich, auszubauen. Es wird also keine Revolution geben, sondern die Evolution muss weitergehen. Nur so können wir langfristig Kunden binden und unsere Erträge steigern.

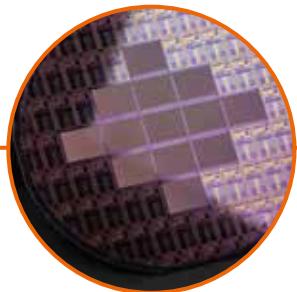
EUROPE'S FIRST LONG-WAVE INFRARED SUPERLATTICE CAMERA

ERSTE EUROPÄISCHE ÜBERGITTERKAMERA FÜR DAS LANGWELLIGE INFRAROT

ROBERT REHM

robert.rehm@iaf.fraunhofer.de

LWIR type-II superlattice focal plane arrays



- 640 x 512 pixels arranged on 15 μm pitch
- Sensitive up to a wavelength of 10.3 μm
- Excellent thermal resolution (NETD) of 30 mK



Particularly, the safety & security as well as the research & development market segments require high-performance infrared imagers for the long-wavelength infrared (8 – 12 μm) spectral region. In this wavelength regime, we have now demonstrated in close corporation with our industrial partner AIM Infrarot-Module GmbH Europe's first infrared imager based on the versatile InAs/GaSb type-II superlattice detector technology. The demonstrator camera with a spatial resolution of 640 x 512 pixels achieves an excellent thermal resolution below 30 mK at an operation temperature of 55 K.

The dominant photon emission of objects with a temperature close to common environmental conditions occurs in the long-wavelength infrared (LWIR) transmission window (8 – 12 μm) of the atmosphere. Hence, a truly passive LWIR camera does not require illumination from sources like the sun, the moon, the »night glow« or other artificial IR illuminators to detect objects with minimal thermal contrast to the surrounding background. Under difficult environmental conditions with fog, dust, or smoke the reduced Rayleigh scattering of long-wavelength electromagnetic radiation allows for much longer detection ranges in the LWIR compared to imaging systems working at shorter wavelengths. Furthermore, the 8 – 12 μm region overlaps with the well-known »finger print region« for chemical sensing, where many characteristic molecular absorption features are located. LWIR focal plane array (FPA) detectors are therefore a core component for modern night vision and hyperspectral imaging systems.



1 *Fraunhofer IAF imaged with a 640 x 512 type-II superlattice camera in the long wave infrared.*

Aufnahme des Fraunhofer IAF mit einer 640 x 512 Typ-II-Übergitter-Kamera im langwirigen Infrarot.

Insbesondere in den Marktsegmenten Sicherheit und Gefahrenabwehr sowie in der Forschung und Entwicklung werden leistungsfähige bildgebende Infrarot-Kameras für den langwelligen Spektralbereich (8 – 12 μ m) benötigt. Gemeinsam mit unserem Industriepartner AIM Infrarot-Module GmbH haben wir nun für diesen Bereich auf Basis der flexiblen InAs/GaSb-Typ-II-Übergittertechnologie den ersten europäischen Demonstrator realisiert. Bei einer räumlichen Auflösung von 640 x 512 Bildpunkten erzielt die Kamera eine exzellente thermische Auflösung von etwa 30 mK bei einer Betriebstemperatur von 55 K.

Die dominante Photonemission von Objekten, die nahezu Raumtemperatur aufweisen, tritt im langwelligen atmosphärischen Transmissionsfenster bei 8 – 12 μ m (LWIR) auf. Zur Detektion von Objekten mit geringem thermischem Kontrast zum umgebenden Hintergrund, benötigt eine passive LWIR-Kamera daher keinerlei Szenenbeleuchtung durch Quellen wie die Sonne, den Mond, den »night glow« oder andere künstliche Quellen. Im Vergleich zu bildgebenden Systemen, welche bei kürzeren Wellenlängen arbeiten, erlaubt die reduzierte Rayleigh-Streuung im längerwelligen Regime auch bei schwierigen Umgebungsbedingungen wie Nebel, Staub oder Rauch wesentlich höhere Detektionsreichweiten. Zudem überlappt der 8 – 12 μ m Bereich mit der bekannten Region des »chemischen Fingerabdrucks«, in welcher viele spezifische molekulare Absorptionslinien liegen. LWIR-Detektormatrizen stellen daher eine Kernkomponente für moderne Nachtsichtgeräte und bildgebende Hyperspektralsysteme dar. Den Sektor kostengünstiger LWIR-Bildfeldmatrizen besetzen heute ungekühlte Mikro-Bolometerarrays. Das Marktsegment für leistungsfähige, mittels Stirling-Kühler betriebene Geräte dominieren Detektoren auf Basis von Cadmiumquecksilbertellurid (CMT) mit einer typischen Betriebstemperatur um 70 K. Intrinsische Limitierungen, wie etwa die zunehmend scharfe Abhängigkeit der Bandlücke vom Cadmiumgehalt und die sehr schwache Hg-Te-Bindung limitieren jedoch die Leistungsfähigkeit von CMT-Detektoren im langwelligen Bereich.

30 mK

THERMAL RESOLUTION / THERMISCHE AUFLÖSUNG

***State-of-the-art type-II
superlattice devices
provide an excellent
thermal resolution.
Typ-II-Übergitter-
Kameras liefern eine
exzellente thermische
Auflösung.***

Bildgebende InAs/GaSb-Typ-II-Übergitter-Detektormatrizen für das LWIR

Mit seinen InAs/GaSb-Typ-II-Übergitterdetektoren (T2SL) entwickelt das Fraunhofer IAF eine kostengünstige Alternative mit vergleichbar hoher elektrooptischer Leistungsfähigkeit. Kurzperiodische T2SL-Detektoren erlauben eine hervorragende Kontrolle über die langwellige Detektionsgrenze bzw. die Bandlücke und können auf großflächigen, kommerziellen Substraten, welche heutzutage bis zu einem Durchmesser von 6" verfügbar sind, hergestellt werden. Die inhärente Designfreiheit in InAs/GaSb-T2SLs wird heutzutage genutzt, um neuartige, Heterostruktur-basierte Bauelementtypen zu realisieren, welche geeignet sind, mehrere Dunkelstromkomponenten zu unterdrücken. Auf diese Art und Weise lassen sich das Signal-zu-Rausch-Verhältnis ebenso wie die Betriebstemperatur steigern, ohne dass hierfür die langwellige Detektionsgrenze geopfert werden müsste.

While the commercial, low-cost sector of the market for LWIR focal plane arrays today is occupied by uncooled microbolometer arrays, Stirling-engine cooled Mercury Cadmium Telluride (CMT) detectors with a typical operating temperature around 70 K presently dominate the high-performance sector. However, intrinsic limitations like the increasingly sharp dependence of the bandgap on the cadmium content and the very weak Hg-Te bond limit the performance of CMT detectors in the very long-wavelength range.

»Realizing high-performance focal plane arrays for the long-wavelength region and beyond is considered the most demanding challenge in infrared detector technology.«

Robert Rehm, Head of Business Unit »Photodetectors«.

InAs/GaSb Type-II superlattice focal plane array imagers for the LWIR

With InAs/GaSb type-II superlattice (T2SL) detectors Fraunhofer IAF develops an affordable alternative with a comparably high electro-optical performance. Short-period T2SL detectors offer excellent control of the long-wavelength cut-off, i. e. the bandgap, and can be realized on large-area commercial substrates, that are available with up to 6" diameter today. The freedom of design inherent to InAs/GaSb T2SLs is nowadays used to realize novel device types based on heterojunction concepts suppressing several dark current components. In this way, the signal-to-noise ratio of the detector as well as the operation temperature can be raised without sacrificing the long cut-off wavelength.

Europe's first InAs/GaSb T2SL imager for the LWIR

In cooperation with our industrial partner AIM Infrarot-Module GmbH we have recently realized Europe's first InAs/GaSb T2SL imager for the LWIR, which already delivers a high image quality. The active region of the demonstrator device is based on an early version of a heterojunction design developed in a common project funded by the German Ministry of Defense. The T2SL-FPA with a spatial resolution of 640 x 512 pixels

(15 μ m pitch) detects IR photons up to 10.3 μ m, where the long-wavelength cut-off is determined by the bandgap of the T2SL absorber. Operated at a temperature of 55 K with f/2-optics, the demonstrator camera achieves a noise equivalent temperature difference of 30 mK for a 300 K background scene, which is an excellent value in the LWIR.

The latest refinements of the vertical device design that are under development in the on-going project are expected to lead to further improvements of both the operation temperature and the electro-optical performance. In addition, the development efforts for the reduction of the pixel pitch and the increase of the spatial resolution into the megapixel regime are also underway. Combined with epitaxial growth on large area GaSb substrates, T2SL-FPAs for the LWIR regime are emerging to develop into a serious alternative to CMT-based modules within the next few years.

55 K

**OPERATION
TEMPERATURE /
BETRIEBS-
TEMPERATUR**

Type-II superlattice
flexibility offers head
room for improving the
operation temperature.

Das flexible Material-
system der Typ-II-Über-
gitter-Kamera wird
künftig noch höhere
Betriebstemperaturen
als bisher erlauben.

Erste europäische InAs/GaSb-Übergitterkamera für das LWIR

In Zusammenarbeit mit unserem Partner AIM Infrarot-Module GmbH haben wir vor kurzem die erste europäische InAs/GaSb-Übergitterkamera für das LWIR realisiert, welche bereits eine hohe Bildqualität erzielt. Der aktive Bereich des Demonstrators basiert auf einer frühen Heterostruktur-Version, welche in einem durch das Bundesministerium der Verteidigung geförderten Projekt gemeinsam entwickelt wurde. Die T2SL-Bildfeldmatrix mit einer räumlichen Auflösung von 640×512 Bildpunkten auf $15 \mu\text{m}$ Rastermaß detektiert Photonen bis zu einer Wellenlänge von $10,3 \mu\text{m}$, wobei die langwellige Grenze durch die T2SL-Bandlücke bestimmt ist. Bei einer Betriebstemperatur von 55 K erzielt die Demonstratkamera mit F/2-Optik eine thermische Auflösung von etwa 30 mK bei einem Szenenhintergrund von 300 K. Dies stellt im LWIR einen hervorragenden Wert dar.

Wir erwarten, dass die jüngsten Weiterentwicklungen des vertikalen Bauelementdesigns im Rahmen des laufenden Forschungsprojekts zu Verbesserungen der Betriebstemperatur und der elektrooptischen Leistungsfähigkeit führen werden. Des Weiteren arbeiten wir an der Reduktion der Pixelgröße und der Erhöhung der räumlichen Auflösung in das Megapixel-Regime. Zusammen mit der Epitaxie auf großflächigen Substraten werden T2SL-Bildfeldmatrizen für das LWIR in den kommenden Jahren zunehmend zu einer ernsthaften Alternative für CMT-basierte Module entwickelt werden.

HIGH-SENSITIVITY PHOTODETECTORS

PHOTODETEKTOREN MIT HOHER EMPFINDLICHKEIT

FRANK RUTZ
frank.rutz@iaf.fraunhofer.de

SWIR APD modules



- InGaAs-based avalanche photodiode
- Detection cut-off wavelength: 1.7 µm
- Integrated transimpedance amplifier and thermo-electric cooler
- Compact TO-8 package



Extremely sensitive photodetectors in the non-visible spectral range are required for many optical sensing applications, e. g. for high-resolution spectroscopy. At Fraunhofer IAF we strive to continuously increase the signal-to-noise ratio by optimizing the characteristics of the detector material and the device processing.

The ultimate sensitivity of the photodetectors can be achieved by employing an internal signal gain by using the avalanche effect for signal enhancement.

Photodetectors for various spectral ranges are required for optical sensing applications, including all formats from single-element devices to large-format focal plane arrays. Beyond the visible spectrum, Fraunhofer IAF addresses several non-visible spectral ranges utilizing dedicated III/V semiconductor materials and process technology. This includes the InGaAs/InP material system for the short-wavelength infrared (SWIR, 0.9 – 1.7 µm), InAs/GaSb type-II superlattices for the mid- and long-wavelength infrared (MWIR, 3 – 5 µm, and LWIR, 8 – 12 µm), and AlGaN as well as InGaN for the ultraviolet (UV, 200 – 400 nm). Some of the sensing applications within these spectral ranges suffer from typically low photon fluxes incident on the photodetectors. Therefore, the photodetectors are required to provide very high sensitivities.

SWIR photodetectors for remote sensing

Light detection and ranging (LIDAR) is a versatile measurement principle utilizing a pulsed laser source and a high-sensitivity



1 Future satellite-borne LIDAR systems can be equipped with short-wave infrared avalanche photodiodes.

Künftige LIDAR-Systeme, z. B. in Satelliten, können mit Avalanche-Photodioden für das kurzwellige Infrarot ausgestattet werden.

Viele Anwendungen optischer Sensoren im nicht-sichtbaren Spektralbereich, wie die hochauflösende Spektroskopie, benötigen Photodetektoren höchster Empfindlichkeit. Am Fraunhofer IAF streben wir eine kontinuierliche Steigerung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses durch Optimierung der Detektormaterialeigenschaften und der Bau-elementprozessierung an. Die größtmögliche Empfindlichkeit von Photodioden kann durch Ausnutzung einer internen Signalverstärkung über den Avalanche-Effekt erzielt werden.

In optischen Anwendungen werden Photodetektoren für verschiedenste Formate, vom Einzelbauelement bis hin zur großformatigen Bildfeldmatrix, und Spektralbereiche eingesetzt. Für die Spektralbereiche jenseits des Sichtbaren kann das Fraunhofer IAF mit spezialisierter III/V-Halbleitermaterial- und Prozesstechnologie aufwarten. Dies beinhaltet das InGaAs/InP-Materialsystem für das kurzwellige Infrarot (SWIR, 0,9 – 1,7 µm), InAs/GaSb-Typ-II-Übergitter für das mittel- und langwellige Infrarot (MWIR, 3 – 5 µm, bzw. LWIR, 8 – 12 µm) und AlGaN sowie InGaN für den ultravioletten Bereich (UV, 200 – 400 nm). Bei einigen Sensoranwendungen innerhalb dieser Spektralbereiche sind sehr geringe Photonenflüsse zu erfassen, sodass Photodetektoren mit sehr hoher Empfindlichkeit benötigt werden.

SWIR-Photodetektoren für die Fernerkundung

Lichtortung und -abstandsmessung (LIDAR) ist ein vielseitiges Messverfahren, bei dem eine gepulste Laserquelle mit einem hochempfindlichen Detektor kombiniert wird. Die Laufzeit der Lichtpulse erlaubt Rückschlüsse über die Entfernung zu den reflektierenden oder streuenden Objekten, was unter anderem zur Kontraststeigerung in entfernungsabhängiger Bildgebung (range-gated viewing) oder zur abstandsfähigen Spektroskopie eingesetzt wird. Je nach Anwendung können unter Umständen nur als augensicher geltende Laserwellenlängen oder solche, die zu bestimmten MolekülabSORptionslinien passen, eingesetzt werden. Für diese Fälle werden wiederum entsprechende SWIR-Detektoren benötigt.

Am Fraunhofer IAF wurden kürzlich SWIR-Detektormodule entwickelt, die jeweils eine Avalanche-Photodiode (APD), einen Transimpedanzverstärker (TIA), sowie die Spannungsversorgung und Rückkoppelschaltkreise und einen thermoelektrischen Kühler (TEC) mit Temperatursensor zur Stabilisierung der Betriebstemperatur der APD und des Operationsverstärkers des TIA beinhalten. Alle Komponenten wurden in ein TO-8-Gehäuse integriert.

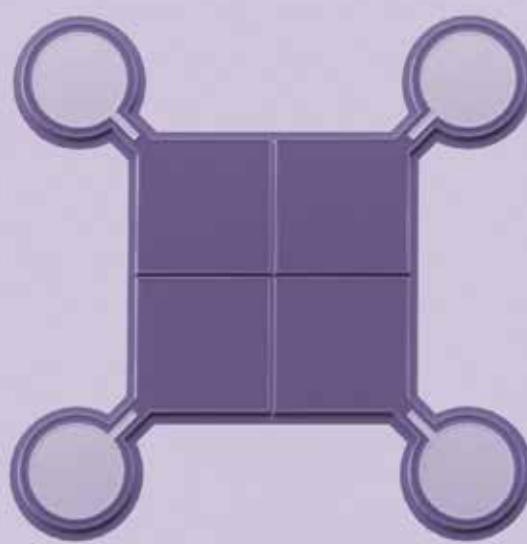
Die SWIR-APD wurde am Fraunhofer IAF entwickelt und hergestellt. Als Material zur Photoabsorption dient InGaAs mit einer Grenzwellenlänge von 1,7 µm, was für zahlreiche LIDAR-Anwendungen sehr gut geeignet ist. In Kombination mit maßgeschneiderten InAlAs-Schichten bildet es eine Heterostruktur-APD mit einem internen Signalgewinnfaktor bis zu 300 nahe der

300

**GAIN FACTOR /
GEWINNFAKTOR**

**Maximum gain factor
of the avalanche
photodiode below
breakdown voltage.**

**Gewinnfaktor der
Avalanche-Photodiode
unterhalb der Durch-
bruchspannung.**



2

detector. The time of flight of the light pulses yields information on the distance to the reflecting or scattering object, which can be used for contrast enhancement in range-gated viewing or remote spectroscopic applications. Depending on the individual application, the necessity of lasers with emission wavelengths in the eye-safe range or at certain molecular absorption lines calls for appropriate SWIR detectors.

Fraunhofer IAF has recently developed SWIR detector modules, each comprising an avalanche photodiode (APD), a transimpedance amplifier (TIA), the bias supply and feedback circuit, and a thermo-electric cooler (TEC) with thermocouple, which stabilizes the operating temperature of the APD and of the operational amplifier of the TIA. The components are assembled into a TO-8 package.

»The numerous degrees of freedom in the design of avalanche photodiodes open up a wide range of performance optimization for the individual application.«

Frank Rutz, group »Detector Measurement«.

The SWIR APD has been developed and fabricated in-house. InGaAs as photoabsorber material with a cut-off wavelength around 1.7 µm is well suited for many LIDAR applications. In combination with tailored InAlAs layers, it forms a heterostructure APD providing an internal signal gain factor of 300 close to the breakdown voltage of 23 V. The typical working point of the APD at moderate gain factors between 10 and 20 can be held steady at relatively low reverse bias voltage of approximately 20 V.

LWIR photodetectors for spectroscopy

Photonic integrated circuits, laser-based sensing platforms as well as infrared and Raman spectrometers rely on highly-sensitive IR detectors as a core component of the system.

Particularly for the LWIR, in which a variety of chemical finger prints are located, the configurable InAs/GaSb superlattice photodiodes of the Fraunhofer IAF are an affordable alternative to established CdHgTe detectors. While CdHgTe detectors suffer from low-frequency noise and responsivities that are not linear to the IR intensity, InAs/GaSb superlattices are superior in that respect and offer comparable performance for other parameters. Individually tailored detector characteristics, geometries, and arrangements allow for customized IR detectors, including single-element detectors with optical apertures exceeding 1 mm, four-quadrant detectors, or even more sophisticated arrangements in one or two dimensions.

Visible-blind UV photodetectors

UV detectors based on the semiconductor materials AlGaN and InGaN display many promising properties; for example, the sensitive spectral region can be tuned by adjusting the composition. Standard UV photodiodes have been assembled into compact TO-18 devices and turned out to be very robust against high-intensity UV radiation. Moreover, Fraunhofer IAF is currently also developing highly sensitive UV APDs. Exploiting the avalanche effect to achieve an internal gain of the signal enables the operation in low-intensity applications, such as characterization of respirable dust, exhaust gas analysis, or missile approach warning systems. In summary, nitride-based UV detectors prove to provide both high sensitivity and radiation hardness at the same time.



3

2 Scanning electron microscope image of a single and a four element InAs/GaSb super-lattice detector for the LWIR.

Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines Einzel- und eines Vierquadranten-InAs/GaSb-Übergitterdetektors für das LWIR.

3 Narrow-band UV detectors in TO-18 cans.

Schmalbandige UV-Detektoren in TO-18-Gehäusen.

Durchbruchsspannung von etwa 23 V. Der typische Arbeitspunkt dieser APD bei einem moderaten Gewinnfaktor von 10 bis 20 kann bei einer relativ geringen Rückwärtsspannung von 20 V stabil gehalten werden.

LWIR-Photodetektoren für die Spektroskopie

Für integriert-optische Schaltungen, Laser-basierte Sensor-Plattformen sowie Infrarot- und Raman-Spektrometer sind IR-Detektoren mit hoher Empfindlichkeit das Herzstück des Systems. Insbesondere für das LWIR, das eine Vielzahl der chemischen »Fingerabdruck«-Signaturen beinhaltet, stellen die einstellbaren InAs/GaSb-Übergitter-Photodioden des Fraunhofer IAF eine kostengünstige Alternative zu den etablierten Detektoren aus CdHgTe dar. CdHgTe-Detektoren sind anfällig für niederfrequentes Rauschen und eine Signalantwort, die sich nicht linear zur Strahlungsintensität verhält. InAs/GaSb-Übergitter sind diesbezüglich überlegen und bieten ansonsten vergleichbare Leistungswerte. Individuell zugeschnittene Detektoreigenschaften, -geometrien und -anordnungen ermöglichen kundenspezifische IR-Detektoren von Einzelbauelementen mit mehr als 1 mm optischer Apertur über Vier-Quadrant-Detektoren bis hin zu anspruchsvoller Anordnungen in einer oder zwei Dimensionen.

Gegenüber sichtbarem Licht unempfindliche UV-Photodetektoren

UV-Detektoren, basierend auf dem AlGaN- und InGaN-Materialsystem, bieten vielversprechende Eigenschaften, wie beispielsweise das Einstellen des sensitiven Spektralbereichs über die Materialzusammensetzung. Standard-UV-Photodioden haben sich als robust gegenüber hohen Strahlungsintensitäten erwiesen und wurden bereits für verschiedene Anwendungen in kompakte TO-18-Gehäuse aufgebaut. Darüber hinaus entwickelt das Fraunhofer IAF gegenwärtig auch hochempfindliche UV-APDs. Der Avalanche-Effekt zur internen Signalverstärkung ermöglicht den Einsatz bei sehr geringen Intensitäten, wie sie zum Beispiel bei der Bestimmung von Feinstaub, der Abgasanalyse oder bei Raketenwarnsystemen auftreten. Es hat sich also gezeigt, dass sich aus dem AlGaN/InGaN-Materialsystem äußerst leistungsfähige und zugleich strahlungsresistente UV-Detektoren entwickeln lassen.

20 V
BIAS VOLTAGE /
ARBEITSSPANNUNG

Avalanche photodiode with gain factor of 10 at low bias voltage.

Avalanche-Photodiode mit einem Verstärkungsfaktor von 10 bei geringer Arbeitsspannung.

STRUCTURAL QUALITY OF AlGaN LAYERS FOR UV PHOTODETECTORS

STRUKTURELLE QUALITÄT VON AlGaN-SCHICHTEN FÜR UV-PHOTODETEKTOREN

LUTZ KIRSTE
lutz.kirste@iaf.fraunhofer.de

Analyses of AlN substrate quality and the structural properties of MOVPE-grown AlGaN heterostructures for UV photodetectors deposited on AlN/sapphire templates and on freestanding AlN substrates were performed at Fraunhofer IAF. The comparison of AlGaN layers grown on AlN/sapphire templates with layers grown on AlN substrates shows that improved AlGaN material quality with low defect density is possible with AlN substrates.

UV photodetectors based on aluminum gallium nitride (AlGaN) are well-suited for monitoring high intensity ultraviolet radiation sources, e. g. for water treatment. For the detection of low intensity UV signals, e. g. for spectroscopic applications, devices with extremely low dark current are required.

Typically, AlGaN detector structures are fabricated on sapphire substrates. Their advantages are the UV transparency, which enables the fabrication of detector structures for backside illumination, as well as their low price. But, due to the large lattice mismatch, there is a high density of threading dislocations (TDDs) in AlGaN layers grown on sapphire substrates, leading to increased dark current values. Various approaches for reducing the TDD in the AlGaN layers have been pursued. However, the TDD can only be reduced to values of approx. 10^8 cm^{-2} to 10^9 cm^{-2} . This is still too high for outstanding device performance. Therefore, freestanding AlN substrates with low defect density and high UV transparency are the substrate material of choice for the realization of AlGaN-based detector structures with superior properties. Lately, AlN substrates in sizes up to 50 mm have become available by various manufacturers. The AlN substrates differ in the structural perfection and homogeneity, as well as transparency in the (deep) UV.

X-ray topography of AlN substrates

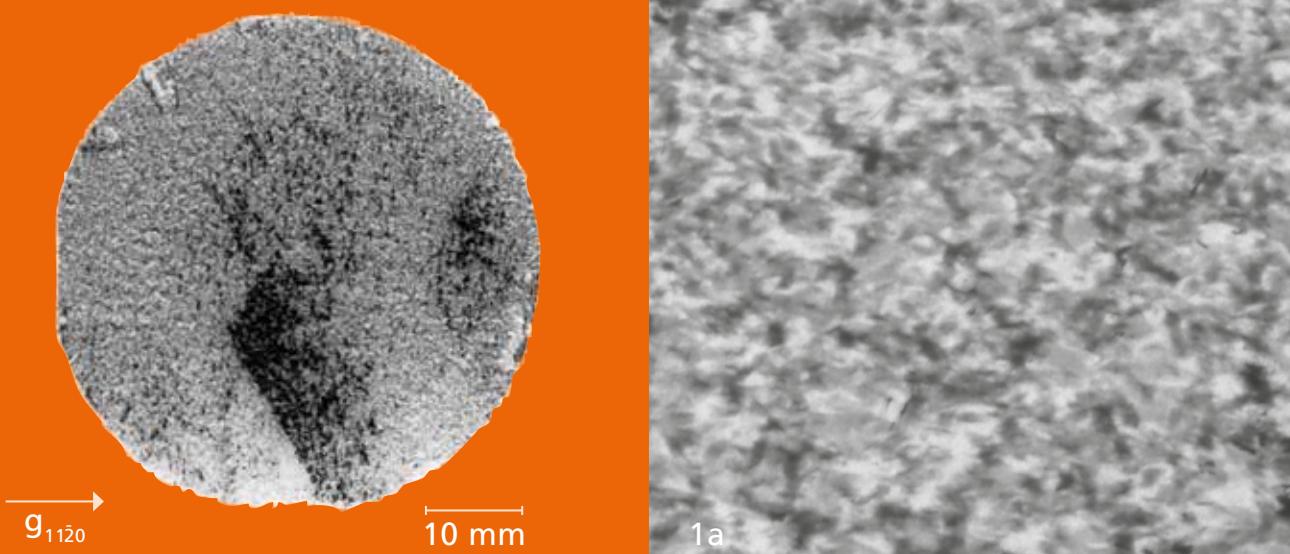
For this reason, the structural properties of commercial freestanding AlN substrates of different manufacturers are investigated. Fig. 1 and Fig. 2 show X-ray diffraction topographs of AlN substrates from two different vendors (sample A and

B). Sample A has a diameter of 50 mm and sample B has a diameter of 25 mm. For sample A, the exposure reveals a blurred light-dark contrast with a mosaic-like grain structure. This can be interpreted as orientation contrast of a heavily deformed crystal with tilted and twisted AlN grains. For an identification of individual TDDs the density of the deformed crystals is too high. A much better crystalline perfection, but with a heterogeneous distribution of dislocations, was determined from the topography of sample B (Fig. 2). In the center of the wafer, two regions with threading edge dislocations (TEDs) are visible. These TEDs either replicate from the seed or form from separate regions growing with slightly different rotations (Fig. 2a). Basal plane dislocations (BPDs) become visible at the wafer edges (Fig. 2b). In any way, there are crystal regions in the mm^2 -scale, which are almost free of dislocations.

Structural properties of AlGaN layers on AlN substrates

The influence of the AlN substrate quality on the structural properties of AlGaN thin film heterostructures for UV detectors was investigated by high resolution X-ray diffraction (HRXRD). All layers for the detector structures were grown by metal-organic vapor phase epitaxy (MOVPE) in a multi-wafer planetary reactor at growth temperatures above 1200 °C. Due to the superior quality, AlN substrates of the manufacturer B were used. For comparative purposes, structures on standard AlN/sapphire templates were grown.

Fig. 3 and 4 show so-called »reciprocal space maps« (RSM) from AlGaN UV detector test structures deposited on an AlN/sapphire template and freestanding AlN substrate, respectively. A RSM is a 2-dimensional diffraction pattern taken from a number of scans with slightly different angular offsets. An RSM of an asymmetric reflection range gives information about the strain relation of the various layers. Only if the reflections of two layers, or a layer and the substrate, are sequenced on a vertical line, the lower layer is fully strai-



1

1 $1\bar{1}20$ Lang transmission topography of a 50 mm AlN substrate of vendor A. The crystal has mosaic-like grain structure.

Fig 1a: Enlarged section of Fig. 1. Due to the lattice misorientation, the diffracted beams can overlap or diverge, indicating a mosaic structure of independently diffracting AlN grains separated by grain boundaries.

$1\bar{1}20$ Lang-Transmissions-

Topographie eines 50 mm AlN-Substrates von Hersteller A. Der Kristall zeigt eine mosaikähnliche Kornstruktur.

Fig. 1a Vergrößerter Auszug aus Fig. 1. Aufgrund der Gitterfehlaufrichtung können die gebeugten Strahlen überlappen oder divergieren, was auf eine mosaik Struktur unabhängiger AlN-Körner, die durch die Korngrenzen getrennt sind, hinweist.

Die Qualität von AlN-Substraten, sowie die strukturellen Eigenschaften von mittels MOVPE gewachsenen AlGaN-Heterostrukturen für UV-Photodetektoren, die entweder auf AlN-Saphir-Templates oder auf freistehenden AlN-Substraten abgeschieden wurden, konnten am Fraunhofer IAF detailliert untersucht werden. Der Vergleich von AlGaN-Schichten, die auf AlN-Substraten gewachsen wurden, mit auf AlN-Saphir-gewachsenen Schichten zeigt, dass mit AlN-Substraten eine deutlich verbesserte Materialqualität des AlGaN erreicht werden kann.

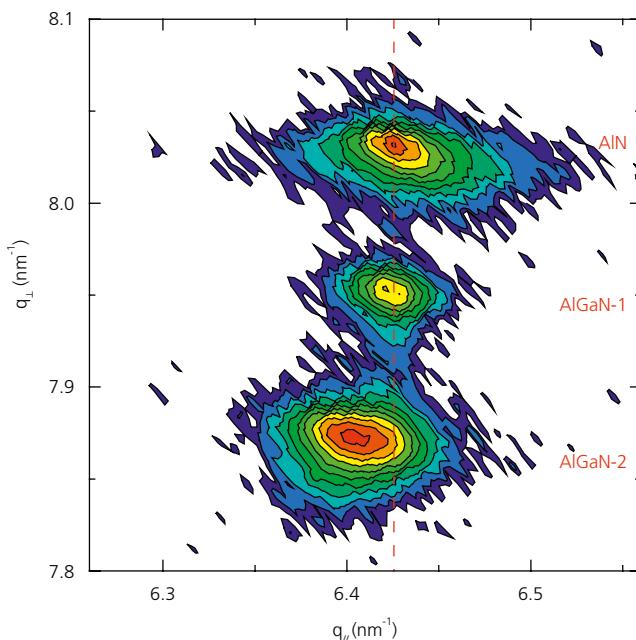
UV-Photodetektoren auf Basis von AlGaN eignen sich besonders gut für die Überwachung hochintensiver ultravioletter Strahlquellen, z. B. bei der Wasseraufbereitung. Für die Detektion von UV-Signalen mit geringer Intensität, z. B. bei der Spektroskopie, sind Komponenten mit extrem niedrigem Dunkelstrom notwendig. Typischerweise werden AlGaN-Detektorstrukturen auf Saphir-Substraten hergestellt. Ihre Vorteile sind die UV-Transparenz, die die Herstellung von Detektorstrukturen für die rückwärtige Belichtung ermöglicht, sowie ihr niedriger Preis. Andererseits führt die große Gitterfehlanpassung zu einer hohen Dichte von Fadenversetzungen (TDD) in AlGaN-Schichten auf Saphir-Substrat, was in gesteigerten Dunkelstromwerten resultiert. Verschiedene Ansätze zur Reduzierung der TDDs wurden verfolgt, jedoch konnten diese nur auf Werte zwischen ungefähr 10^8 cm^{-2} bis 10^9 cm^{-2} reduziert werden. Das ist jedoch noch zu hoch, um eine hervorragende optoelektronische Leistung der Bauelemente zu erzielen. Daher sind freistehende AlN-Substrate mit geringer Defektdichte und hoher UV-Transparenz das Material der Wahl für die Herstellung AlGaN-basierter Detektorstrukturen. Seit einiger Zeit sind AlN-Substrate mit Durchmessern bis zu 50 mm verfügbar. Die AlN-Substrate unterscheiden sich in ihrer strukturellen Perfektion und Homogenität, sowie Transparenz im (tiefen) UV-Bereich.

Röntgentopographie von AlN-Substraten

Aus diesem Grund werden die strukturellen Eigenschaften kommerziell erhältlicher freistehender AlN-Substrate verschiedener Hersteller evaluiert. Fig. 1 und 2 zeigen Röntgenbeugungs-Topographien von zwei AlN-Substraten unterschiedlicher Hersteller (Probe A und B). Probe A misst im Durchmesser 50 mm, Probe B 25 mm. Die Aufnahme von Probe A zeigt einen verschwommenen Hell-Dunkel-Kontrast mit einer mosaikähnlichen Kornstruktur. Dies kann als Orientierungskontrast eines stark deformierten Kristalls mit verkippten und gedrehten AlN-Körnern interpretiert werden. Für eine Identifizierung der individuellen TDDs ist die Dichte des deformierten Kristalls zu hoch. Eine sehr viel bessere kristalline Perfektion wurde mittels der Topographie von Probe B bestimmt, allerdings mit einer heterogenen Verteilung der Versetzungen (Fig. 2). Im Zentrum des Wafers sind zwei Bereiche mit Faden-Stufenversetzung (TEDs) sichtbar. Diese TEDs replizieren sich entweder aus dem Kristallkeim, oder bilden sich aus getrennten Bereichen, die mit leicht unterschiedlichen Rotationen wachsen (Fig. 2a).

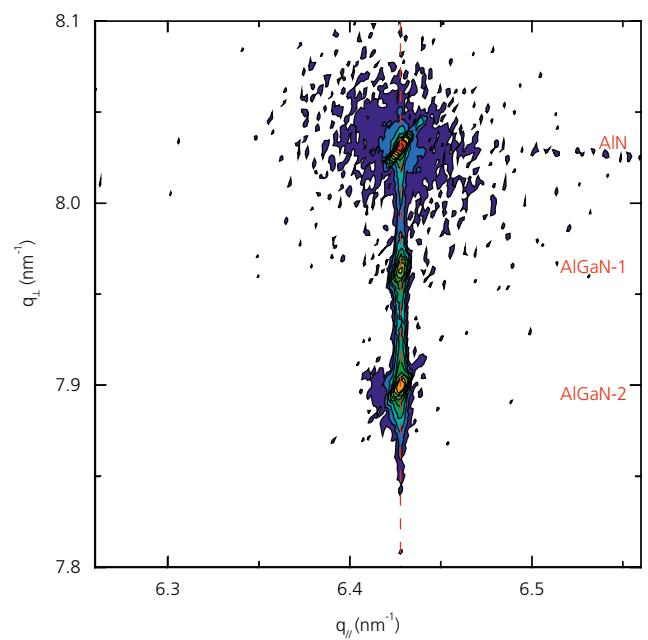
ned to the upper one. Additionally, the position of reflections can be used to determine the Al concentration of the AlGaN solid solution layers. The broadening of the reflections provides information about the structural perfection of the layers and the substrate. Fig. 3 shows the $11\bar{2}4$ RSM of the reflection range of an AlGaN UV-detector test structure deposited on an AlN/sapphire template. Starting from the reflection of the AlN template layer the reflection of the AlGaN-1 layer (80 % Al) is slightly shifted from a vertical line (dashed red line) in reciprocal space in relation to the AlN reflection, indicating incipient relaxation. For the AlGaN-2 layer (50 % Al) the relaxation is visible due to the drifting away of the reflection position of the vertical line. Relaxation of crystal layers is associated with

the formation of dislocations which have a negative effect on the performance and lifetime of semiconductor devices. The $11\bar{2}4$ RSM of an AlGaN UV-detector test structure on an AlN substrate structure shows that the AlN reflection and both AlGaN reflections are on a vertical line (Fig. 4). Thus, the AlGaN layers are grown pseudomorphically without the formation of misfit dislocations due to relaxation. Another characteristic indicating better crystal quality is the lower broadening Δq_{\parallel} for the reflections of the AlGaN structure grown on the AlN substrate compared to the reflections of the AlGaN structure grown on the AlN/sapphire template. The results show that the use of AlN substrates with low defect density is the right way to realize challenging UV detectors, e. g. Avalanche photodiodes.



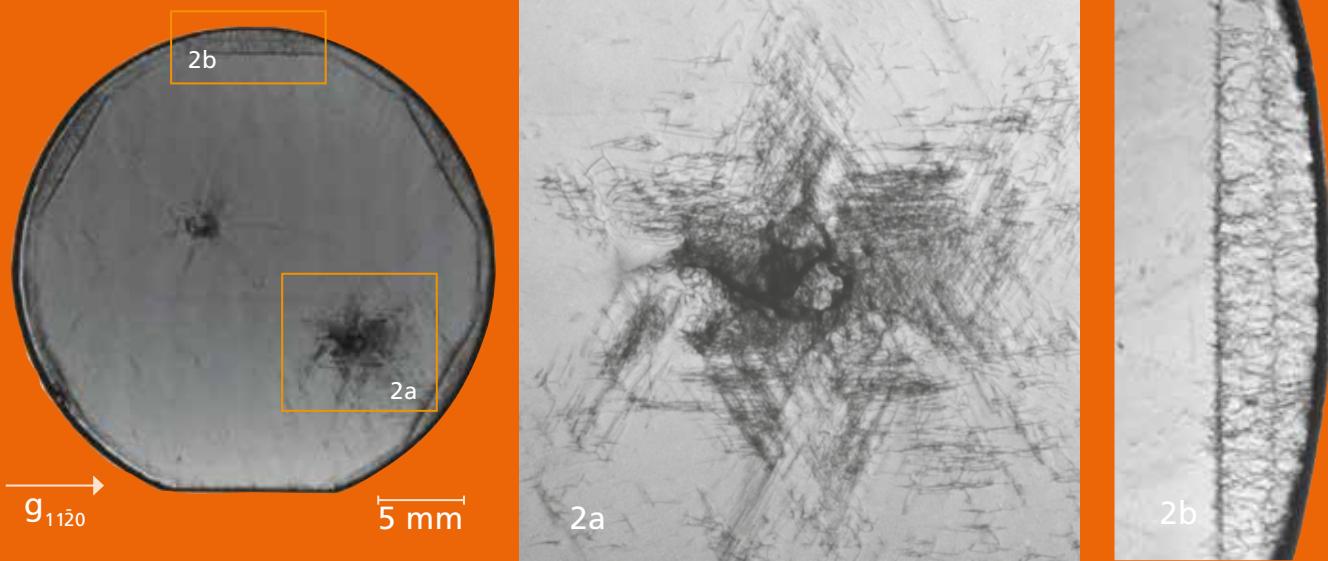
3 $11\bar{2}4$ RSM of AlGaN layers deposited on AlN/sapphire template. The AlGaN layers show relaxation indicated by the drift away of the reflection positions from the dashed red line.

$11\bar{2}4$ RSM von AlGaN-Schichten, abgeschieden auf AlN-Saphir-Template. Die AlGaN-Schichten zeigen eine Entspannung, angedeutet durch das Abdriften der Reflexpositionen von der gestrichelten roten Linie.



4 $11\bar{2}4$ RSM of pseudomorphically grown AlGaN layers on AlN substrate with low defect density.

$11\bar{2}4$ RSM von pseudomorph gewachsenen AlGaN-Schichten auf AlN-Substrat mit geringer Defektdichte.



2

2 11̄20 Lang transmission topography of a 25 mm AlN substrate of vendor B. Apart from areas with TDDs, BPDs and GBs, large areas with very low defect density are visible.

Fig. 2a: Large area grain boundary (LAGB) with threading edge dislocations (TEDs).

Fig. 2b: Basal plane dislocations at the upper wafer edge.

11̄20 Lang-Transmissions-Topographie eines 25 mm AlN-Substrates von Hersteller B. Abgesehen von Bereichen mit TDDs, BPDs und GBs, sind große Bereiche mit sehr geringer Defektdichte sichtbar.

Fig. 2a: Großkorngrenze (LAGB) mit Faden-Stufenversetzung.

Fig. 2b: Basalflächenversetzung am oberen Waferrand.

Basalflächenversetzungen (BPDs) werden an den Außenbereichen der Wafer sichtbar (Fig. 2b). In jedem Fall gibt es Kristallbereiche auf einer mm^2 -Skala, die fast frei von Versetzungen sind.

Struktureigenschaften von AlGaN-Schichten auf AlN-Substraten

Der Einfluss der AlN-Substratqualität auf die Struktureigenschaften von AlGaN-Dünnschichten-Heterostrukturen für UV-Detektoren wurde mit hochauflösender Röntgenbeugung (HRXRD) untersucht. Alle Schichten für die Detektorstrukturen wurden mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie in einem Multi-Wafer-Planetenreaktor bei Wachstumstemperaturen über 1200 °C gewachsen. Aufgrund ihrer höheren Qualität wurden die AlN-Substrate des Herstellers B verwendet. Für Vergleichszwecke wurden auch Strukturen auf standardmäßig verwendeten AlN-Saphir-Templates gewachsen. Fig. 3 und 4 zeigen mit hochauflösender Röntgenbeugung erstellte »Reziproke Gitterkarten« (RSM) von AlGaN-basierten UV-Detektorteststrukturen, die je auf einem AlN-Saphir-Template, sowie einem freistehenden AlN-Substrat abgeschieden wurden. Ein RSM ist ein 2-dimensionales Beugungsmuster, welches durch eine Anzahl von Scans mit leicht unterschiedlichem Winkelversatz generiert wurde. Eine RSM eines asymmetrischen Reflexbereichs gibt Aufschluss über das Spannungsverhältnis verschiedener Schichten. Nur wenn die Reflexe zweier Schichten, oder einer Schicht und des Substrats, auf einer vertikalen Linie liegen, besitzt die obere Schicht den gleichen Gitterparameter a wie die untere Schicht (Substrat). Zudem kann die Position der Reflexe verwendet werden, um die Al-Konzentration in den AlGaN-Mischkristallschichten zu bestimmen. Die Verbreiterung der Reflexe gibt Aufschluss über die strukturelle Perfektion der Schichten und des Substrats. Fig. 3 zeigt die RSM des 11̄24 Beugungsbereichs einer AlGaN-basierten UV-Detektorteststruktur, die auf einem AlN-Saphir-Template abgeschieden wurde. Ausgehend vom Reflex der AlN-Templateschicht liegt der Reflex der AlGaN-1 Schicht (80% Al) in Relation zum Reflex des AlN leicht versetzt von einer vertikalen Linie (gestrichelte rote Linie) im reziproken Raum, was auf eine beginnende Relaxation hinweist. Für die AlGaN-2-Schicht (50 % Al) ist die Relaxation aufgrund des Wegdriftens der Reflexionsposition von der vertikalen Linie sichtbar.

Die Relaxation von Kristallschichten ist verknüpft mit der Bildung von Versetzungen, die eine negative Auswirkung auf die Leistung und Lebensdauer von halbleiterbasierten Bauelementen haben. Die 11̄24 RSM einer AlGaN-basierten UV-Detektorteststruktur auf einem AlN-Substrat zeigt, dass der AlN-Reflex und beide AlGaN-Reflexe auf einer vertikalen Linie liegen (Fig. 4). Somit wurden die AlGaN-Schichten pseudomorph ohne Bildung von Fehlversetzungen gewachsen. Auch die geringere Verbreiterung Δq_{\parallel} der Reflexe der AlGaN-Strukturen, die auf AlN-Substraten gewachsen wurden, im Vergleich zu den Reflexen von auf AlN-Saphir gewachsenen AlGaN-Strukturen, bestätigen die bessere Kristallqualität. Diese Ergebnisse zeigen, dass mit AlN-Substraten mit geringer Defektdichte anspruchsvolle UV-Detektoren realisiert werden können.

SEMICONDUCTOR LASERS HALBLEITERLASER

RALF OSTENDORF
ralf.ostendorf@iaf.fraunhofer.de

Optimizing production processes with quantum cascade lasers

Mit Quantenkaskadenlasern Produktionsprozesse optimieren

»Thanks to our spectrally tunable infrared lasers, we can realize real-time spectroscopic systems in the future. Since our technology in the mid-infrared range is chemically sensitive, it can detect chemical substances more precisely than classical spectroscopic methods in the near-infrared range. This opens up new areas of application, for instance in the food industry where our laser technology can speed up and optimize production and sorting processes, and as a result reduce the amount of rejects.«

Ralf Ostendorf, who is working on quantum cascade lasers for spectroscopic analyses.

»Mithilfe unserer spektral schnell durchstimmbaren Infrarotlaser können zukünftig echtzeitfähige Spektroskopiesysteme realisiert werden. Da unsere Technologie im mittleren Infrarot-Bereich chemisch sehr sensitiv ist, kann sie chemische Substanzen zuverlässiger nachweisen als klassische Spektroskopiemethoden im nahen Infrarot. Dies eröffnet neue Anwendungsmöglichkeiten, z. B. im Bereich der Lebensmittelindustrie, wo unsere Lasertechnologie helfen kann, Produktions- oder Sortierprozesse zu beschleunigen und auf diese Weise Ausschuss zu reduzieren.«

Ralf Ostendorf, der an Quantenkaskadenlasern für die spektroskopische Analyse forscht.



SEMICONDUCTOR LASERS

HALBLEITERLASER



Ralf Ostendorf

Head of Business Unit »Semiconductor Lasers«



Studies: Physics



PhD: Electronic structure of ordered and oxidized silicon carbide surfaces



Fraunhofer IAF staff member: since 2007



Focus of research: Quantum cascade lasers

Mr. Ostendorf, you are taking over the business unit »Semiconductor Lasers«. What is it exactly that characterizes the unit?

We focus on the development of customer-specific laser solutions in the mid-infrared range, spectrally tunable semiconductor disc lasers, and quantum cascade lasers (QCLs) as well as on the continual improvement of LED systems. During the last couple of years we have made great progress in the application of our laser technologies. We have moved from fundamental physics regarding chip-level infrared semiconductor lasers to a system approach and increasingly offer modules and laser systems today. In the future, the focus will be placed on holistic system solutions in which both infrared lasers and LEDs can be integrated.

What appeals to you personally about the position as head of business unit?

What appeals to me is the thematic diversity and opportunity to work more in the broader scientific spectrum instead of engaging with just one subject. I am looking forward to familiarizing myself with new topics in order to, virtually from a bird's eye perspective, recognize new connections and explore novel solutions.

Can you think of a »bridge« that your business unit has successfully built?

Our cooperation with Diehl certainly is a bridge which has been really successful so far. In close collaboration we are developing laser technologies for the protection of airplanes. Our quantum cascade lasers form a crucial component in Diehl's technology which can distract missiles approaching an airplane so that they miss their target. We have continually improved our QCL chips and optimized them for the specific requirements of our partner. After all, if you want to build a bridge, you cannot succeed without constructing a bridge-head on the other side of the river. And that is what is special about Fraunhofer, the fact that we do not just offer an off-the-rack-technology but tailor-made solutions for our partners and customers.

What follows now? What do you envision for the business unit?

The next big step will be to demonstrate real-time sensing systems based on our tunable infrared lasers and consequently expand our technology to new markets and areas of application. The food analysis, for instance, is a particularly interesting area of application in this respect. Regarding fundamental research, I believe the »Lab on a Chip« topic to be of particular importance. This means understanding how we can develop even smaller sensor systems by, for instance, realizing external cavity QCLs on a chip level.

Herr Ostendorf, Sie übernehmen das Geschäftsfeld »Halbleiterlaser«, was genau macht das Geschäftsfeld aus?

Im Geschäftsfeld konzentrieren wir uns auf die Anfertigung kundenspezifischer Laserlösungen im Bereich des mittleren Infrarots, spektral durchstimmbare Halbleiterscheibenlaser und Quantenkaskadenlaser (QCLs), sowie auf die kontinuierliche Weiterentwicklung von LED-Systemen. In den letzten Jahren haben wir, insbesondere was die Anwendungen unserer Lasertechnologien betrifft, enorme Fortschritte gemacht. Wir sind von der grundlegenden Physik der Infrarothalbleiterlaser auf Chip-Level stark in die Systemrichtung gegangen und bieten heute vermehrt Module und Lasersysteme an. In Zukunft wird es um ganzheitliche Systemlösungen gehen, in die sowohl Infrarotlaser als auch LEDs integriert sein können.

Was reizt Sie persönlich an der Position als Geschäftsfeldleiter?

An der neuen Position reizt mich die thematische Vielfalt, zukünftig noch mehr in die wissenschaftliche Breite gehen zu können, anstatt mehr und mehr in die Tiefe eines einzelnen Themas. Mich in neue Themen einzulesen und einzuarbeiten, um dann, quasi aus der Vogelperspektive, neue Zusammenhänge zu erkennen und neue Lösungen zu entdecken.

Fällt Ihnen ein erfolgreicher Brückenschlag für Ihr Geschäftsfeld ein?

Eine schon sehr weit gediehene Brücke ist sicherlich unsere Kooperation mit Diehl. Gemeinsam entwickeln wir Lasertechnologien zum Schutz von Flugzeugen. Unsere Quantenkaskadenlaser bilden eine zentrale Komponente in Diehls System, das auf Flugzeuge zusteuende Raketen ablenkt, sodass sie ihr Ziel verlieren. Wir haben unsere QCL-Chips kontinuierlich verbessert und spezifisch auf die Anforderungen unseres Partners hin optimiert. Wenn man eine Brücke schlagen will, gelingt das schließlich nicht, ohne auch auf der anderen Seite des Ufers einen Brückenkopf zu bauen. Und das ist ja auch das besondere an Fraunhofer, dass wir eben keine Technologie von der Stange anbieten, sondern maßgeschneiderte Lösungen für unsere Partner und Kunden.

Und was folgt nun, welche Vision haben Sie für das Geschäftsfeld?

Der nächste große Schritt wird sein, auf Basis unserer schnell durchstimmbaren Infrarotlaser Echtzeitsensoriksysteme zu demonstrieren und darauf aufbauend neue Anwendungen und Märkte zu erschließen. Sehr interessant ist beispielweise der Bereich der Lebensmittelanalyse. Auf Seiten der grundlegenden Forschung halte ich das Thema »Lab on a Chip« für wichtig. Zu verstehen, wie wir Sensorsysteme noch kleiner umsetzen können, indem man beispielsweise QCLs mit externen Resonatoren in Chipgröße realisiert.

STANDOFF DETECTION OF EXPLOSIVES AND THEIR PRECURSORS

FERNDETEKTION VON EXPLOSIVSTOFFEN UND DEREN VORLAUFMATERIALIEN

FRANK FUCHS
frank.fuchs@iaf.fraunhofer.de

Hyperspectral imaging standoff system



- Identification of traces of explosives
- Eye-safe technology
- Contactless surface analysis
- Limit of detectivity $< 10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$

Broadband tunable external cavity quantum cascade lasers (EC-QCLs) have emerged as attractive light sources for mid-infrared finger print spectroscopy. Our standoff spectroscopy technique builds on EC-QCLs as key components for the detection of a large variety of explosives as TNT, PETN and RDX as well as precursor materials like ammonium nitrate. We have performed reliable standoff detection in real world scenarios over distances of up to 20 m. This includes measurements in a post blast scenario demonstrating the technique's potential in forensic investigation.



Imaging mid-infrared (MIR) backscattering spectroscopy has been shown to be a promising technique for non-contact detection of explosive traces. Our laser-based imaging standoff spectroscopy system allows hyperspectral MIR image acquisition with 100 – 300 different spectral elements using a dual core MIR external cavity quantum cascade laser (EC-QCL) with a total tuning range in wavelength from 7.5 μm to 10 μm . A MIR camera is used to measure the backscattered IR light for each illumination wavelength, producing a three dimensional image cube that is referred to as hyperspectral image. Each pixel vector in a hyperspectral image represents the backscattering spectrum of a specific location in the scene. Applying appropriate image analysis algorithms, chemically sensitive and selective images of almost any object surface can be generated. Target detection algorithms serve to detect, locate and identify explosive residues, by comparing and separating their known finger print spectra from the background spectra



1

1 Real world scenario after the detonation of an IED. Traces of the explosive are distributed on the destroyed car.

Reale Szenerie nach der Detonation einer Bombe. Spuren des verwendeten Explosivstoffes sind auf dem Fahrzeug nachweisbar.

Breit abstimmbare Quantenkaskadenlaser im externen Resonator (EC-QCL) haben sich als attraktive Strahlungsquellen für die »Fingerprint«-Spektroskopie im Bereich des mittleren Infrarots etabliert. Mit dem EC-QCL als Schlüsselkomponente ermöglicht unsere Technik die Detektion einer großen Zahl von Explosivstoffen, wie TNT, PETN und RDX, sowie Vorlaufmaterialien wie Ammoniumnitrat. In realitätsnahen Szenarien konnte die Detektion über Distanzen bis zu 20 m erfolgreich demonstriert werden. Darüber hinaus wurde bei Testsprengrungen das Potenzial der Technik für die forensische Aufklärung nachgewiesen.

Die abbildende Rückstreupektraltechnik im mittleren Infrarot (MIR) stellt eine vielversprechende Technik für die berührungslose Detektion von Explosivstoffspuren dar. Unser Laser-basiertes bildgebendes Abstandsdetektions-System erlaubt die Erstellung eines Hyperspektraldatenbilds mit 100 – 300 Spektralelementen. Schlüsselkomponente dafür ist ein MIR-Quantenkaskadenlaser im externen Resonator (EC-QCL) mit zwei aktiven Schichten mit einem Abstimmungsbereich von insgesamt 7,5 µm bis 10 µm Wellenlänge. Unter Verwendung einer MIR-Kamera zur Detektion der einzelnen Wellenlängen des rückgestreuten Laserlichts wird ein dreidimensionaler Datenkubus, das Hyperspektralbild, aufgebaut. Jeder Pixelvektor eines solchen Hyperspektralbilds beinhaltet das Rückstreupektrum eines bestimmten Punktes in der Szene. Unter Verwendung von geeigneten Analysealgorithmen können chemisch sensitive und selektive Bilder von praktisch jeder Oberfläche erzeugt werden. Die Zieldetektionsalgorithmen können Spuren von Explosivstoffen detektieren, lokalisieren und identifizieren. Durch Vergleich mit den Fingerprint-Spektren der Zieldatenbank können diese Substanzen auch von einem unbekannten Untergrund im Hyperspektralbild separiert werden. Der gegenwärtige spektrale Abstimmungsbereich erlaubt die Detektion einer Vielzahl von Explosivstoffen, darunter TNT, PETN, RDX, sowie Ausgangsmaterialien für Explosivstoffe wie Ammoniumnitrat oder Kaliumchlorat.

20 m

**DETECTION
DISTANCE /
ERFASSUNGS-
ABSTAND**

**Hazardous substances
can be identified over a
distance of up to 20 m.**

*Gefahrstoffe können
aus einer Distanz von
bis zu 20 m identifiziert
werden.*

Detektion von Werkstätten für den Bombenbau

Der Beitrag des Fraunhofer IAF zum EU-FP7-Projekt EMPHASIS (Explosive material production hidden agile search and intelligence system) war die Integration der Abstandsdetektion in ein Sensornetzwerk zur Identifikation von illegalen Werkstätten für den Bau von improvisierten Sprengsätzen in einer urbanen Umgebung. Bei der Abschlussdemonstration auf dem Testgelände der Swedish Defence Research Agency (FOI) waren wir in der Lage in realitätsnahen Szenarien Spuren von Explosivstoffen über Distanzen von ca. 20 m nachzuweisen.

Forensische Untersuchungen nach einem Sprengstoffanschlag

Im EU-FP7-Projekt HYPERION (Hyperspectral imaging IED and explosives reconnaissance system) konnte das Anwendungspotenzial der Technik für forensische Untersuchungen nachgewiesen

in the observed hyperspectral image. The current spectral tuning range allows for detection of a large variety of explosives, including e. g. TNT, PETN, RDX and precursor materials such as ammonium nitrate and potassium chlorate.

Detection of bomb manufacturing facilities

In our contribution to the EU FP7 project EMPHASIS (Explosive material production hidden agile search and intelligence system) the stand-off technique was embedded in a sensor network for the identification of illegal bomb manufacturing facilities in an urban environment.

»Hyperspectral imaging in the spectral region of chemical finger prints enables new interesting applications in the future. A fascinating new world shows up behind every door we open.«

Frank Fuchs, group »Laser Characterization«.

In a demonstration campaign at the test site of the Swedish Defence Research Agency (FOI) we were able to successfully identify traces of explosive substances and precursor materials in a real world scenario over distances of around 20 m.

Forensic investigation in a post blast scenario

In the EU FP7 project HYPERION (Hyperspectral imaging IED and explosives reconnaissance system) we were able to subsequently confirm and extend the technique's application potential in forensic investigations. Measurements performed after the detonation of an improvised explosive device (IED) allowed us to provide information within a short time on the explosive material used for the assembly of the IED. After

arrival at the crime scene the setup can be ready for operation within 15 minutes. The individual measurement lasts about 20 seconds. Thus, within a further 15 minutes a set of 20 – 30 measurements can be established. During the HYPERION final demonstration, the stand-off detection showed a sensitivity of the technology in the range of $1 - 10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ by comparing our results with established forensic techniques. Three test detonations were performed, showing that such a coverage of explosive material typically is found in a radius of about 10 – 20 m around the center of the blast. This way first responders can be supported by speeding up the forensic investigation at a safe distance without penetrating the

disaster scene. Future work concentrates on the realization of a man-portable solution of this technique with low weight, size, and power consumption.

Future applications in industry and life science

Mid-infrared laser-based hyperspectral imaging with tunable quantum cascade lasers enables contactless chemical analysis of almost any surface and thus renders a vast amount of applications in industrial process control possible. First experiments suggest that biologic samples are detectable, which opens the door to future applications in food industry, pharmaceutical and medical research, as well as high spectral resolution infrared microscopy.



2

2 Setup for standoff detection ready for field trials.

Messsystem zur Abstandsdetektion von Gefahrstoffen im Feldtest.

werden. Wir konnten zeigen, dass das System innerhalb kurzer Zeit nach der Detonation eines improvisierten Sprengsatzes Aufklärung über den verwendeten Explosivstoff leisten kann. Nach Eintreffen am Ort des Anschlages ist die Apparatur innerhalb von 15 Minuten einsatzbereit. Die einzelne Messung dauert etwa 20 Sekunden. D. h. nach etwa einer weiteren Viertelstunde steht ein Satz von 20 – 30 Messungen zur Verfügung. Durch Vergleich mit den Resultaten der klassischen Forensik-Daten, die während der HYPERION-Abschlussdemonstration gewonnen wurden, konnte für die Abstandsdetektion eine Empfindlichkeit im Bereich 1 – 10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ nachgewiesen werden. Drei Testdetonationen wurden durchgeführt, bei denen im Umkreis von etwa 10 – 20 m Spuren von Explosivmaterial nachgewiesen werden konnten. Auf diese Weise kann die Aufklärungsarbeit der Einsatzkräfte vor Ort beschleunigt werden, ohne dass die Szene betreten werden muss. Die zukünftige Arbeit konzentriert sich auf die Realisierung einer verkleinerten, tragbaren Variante der Technik mit geringem Gewicht und Energieverbrauch.

Zukünftige Anwendungen in der Produktions- und Medizintechnik

Die abbildende IR-Hyperspektraltechnik mit unseren abstimmbaren Quantenkaskadenlasern erlaubt die chemische Analyse von praktisch jeder Oberfläche. Die hyperspektrale Bildinformation gibt Auskunft über die chemische Zusammensetzung der Oberfläche. Damit eröffnet sich eine Vielzahl von neuen Anwendungen in der industriellen Prozesskontrolle. Darüber hinaus zeigen erste Experimente, dass auch Messungen an biologischen Proben möglich sind. Dadurch erwarten wir neue Anwendungen in der Lebensmittelindustrie, der Mikroskopie und der Medizin.

< 10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$

**LIMIT OF
DETECTIVITY /
MAXIMALE
DETEKTIVITÄT**

*The detection requires
only a low concentration
of explosive traces.*

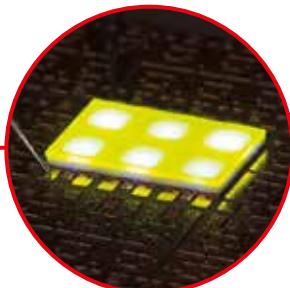
*Die Detektion ist auch
bei einer sehr geringen
Konzentration der Explosivstoffe möglich.*

RELIABLE LEDs FOR HARSH ENVIRONMENTS

ZUVERLÄSSIGE LEDs FÜR ANSPRUCHSVOLLE ANWENDUNGEN

MICHAEL KUNZER
michael.kunzer@iaf.fraunhofer.de

White LED with ceramic converter



- Reliable ceramic phosphor converter
- Hermetic, polymer-free package
- Temperature, humidity, and pollution resistance
- Long lifetime with less color drift



Solid state lighting takes over more and more segments of the illumination market and as a result displaces traditional light sources. For a multitude of demanding applications however, current light emitting diodes with phosphor powder embedded in a polymer matrix reach their limits. In a joint Fraunhofer initiative hermetically sealed, polymer-free LEDs based on luminescent ceramics are developed. They provide a durable, reliable, and color stable LED solution even for challenging applications.

Lighting technology is currently undergoing a fundamental transition from low efficiency and heat generating incandescent bulbs across bulky mercury fluorescent lamps to compact and efficient light emitting diodes (LED). The white luminescence conversion LED (LUCOLED) developed 1995 at Fraunhofer IAF has achieved an unprecedented distribution in most segments of general lighting and hence forms the basis of current solid state lighting. After the continuous growth of the lighting market the worldwide lamp revenues will reach 71 billion € in the year 2017. Until 2020 the LED market penetration is expected to reach around 90 % in all relevant lighting segments. Despite this very successful market introduction, there is a multitude of demanding applications,



1 *Industrial lighting is still very challenging for today's white LED technology.*

Industrielle Anwendungen stellen immer noch eine große Herausforderung für die weiße LED dar.

< 130 lm/W EFFICACY / EFFIZIENZ

The aim is an electrical-optical conversion efficacy of more than 130 lm/W with a maximum allowable electrical power consumption of more than 12 W.

Ziel ist eine elektrisch-optische Konversionseffizienz von mehr als 130 lm/W bei einer maximal zulässigen elektrischen Leistungsaufnahme von mehr als 12 W.

Weiße LEDs erschließen zunehmend weitere Segmente des Beleuchtungsmarkts und verdrängen dabei klassische Leuchtmittel. Für eine Vielzahl anspruchsvoller Anwendungen erreicht die etablierte LED-Technologie mit Leuchtstoffpulver in Polymermatrix jedoch ihre Grenzen. In einer institutsübergreifenden Initiative werden hermetische, polymerfreie LEDs mit Leuchtkeramiken entwickelt, die auch für solche Anwendungen eine langlebige, zuverlässige und farbstabile LED-Lösung ermöglichen.

Die Beleuchtungstechnik durchläuft einen fundamentalen Wandel von Glühlampen mit geringer Effizienz und hoher Wärme-Entwicklung über sperrige Quecksilber-Fluoreszenzlampen hin zu kompakten und effizienten Leuchtdioden (LEDs). Die bereits 1995 am Fraunhofer IAF entwickelte weiße Lumineszenzkonversions-LED (LUCOLED) hat dabei eine beispiellose Verbreitung in fast allen Bereichen der Allgemeinbeleuchtung gefunden und stellte die Grundlage der gegenwärtigen LED-basierten Beleuchtung dar. Nach stetem Wachstum des Beleuchtungssektors beträgt das weltweite Marktvolumen für Leuchtmittel im Jahr 2017 voraussichtlich 71 Mrd. Euro. Bis zum Jahr 2020 wird der LED-Marktanteil in allen wesentlichen Beleuchtungssegmenten voraussichtlich auf ca. 90 % ansteigen. Trotz dieser erfolgreichen Markteinführung gibt es eine Vielzahl von anspruchsvollen Anwendungen, in denen LEDs noch nicht oder nur mit hohem Zusatzaufwand einsetzbar sind. Zu nennen sind hier Anwendungen in hoher Umgebungstemperatur (Schwerindustrie, Automobil), in chemisch-aggressiver oder korrodierender Umgebung (chemische Industrie, Medizintechnik, Hallenbäder, Ställe, Tunnelbeleuchtung, Leuchten mit Streusalzexposition) sowie in schmutzigem oder abrasivem Umfeld (Industrie, Militär).

Der Grund hierfür liegt im Aufbau etablierter Weißlicht-LEDs. Sie bestehen aus blau leuchtenden LED-Chips und einem Konverter aus gelbem Leuchtstoff. Dieser wird durch das blaue Licht angeregt und strahlt in der Summe weißes Licht ab. Das Leuchtstoffpulver ist dabei in einer Polymer- oder Silikonmatrix eingebracht und entweder als Schicht direkt auf oder linsenförmig über den Chip angeordnet. Durch kontinuierliche Chip-Entwicklung sind inzwischen Strom- und Leuchtdichten erreicht, die bereits ohne äußere Einflüsse zu einer extremen photothermischen Belastung des Konverters führen. Ferner hat die Polymermatrix selbst nur eine geringe mechanische und thermische Beständigkeit und ist für Feuchtigkeit und Gase durchlässig. Bei hoher Betriebstemperatur oder eindringenden Schadgasen kommt es dann beschleunigt zu Vergilbung und Korrosion im Innern der LED (Abb. 2). Dabei wird die Lebensdauer reduziert und Farbverschiebungen treten auf, die das Auge sehr genau wahrnehmen kann. Besonders kritisch sind dabei die im Gehäuse und Chip verbauten Silberreflektoren.

in which LEDs require extensive effort or are not suitable at all. These are applications in high ambient temperatures, e. g. in the automotive sector, or in dusty or abrasive settings, such as in military applications, as well as in chemically aggressive or corrosive environments, e. g. for chemical industries, medical equipment, indoor pools, stables, tunnel lighting or lights with salt exposure.

The reason behind this is the design of current white LEDs. They consist of blue light emitting chips and yellow phosphor, which is excited by the blue light and in total produces white light. The yellow phosphor powder is dispersed in a polymer or silicone matrix and is either placed in a layer directly on,

Luminescent ceramics and new packaging technologies

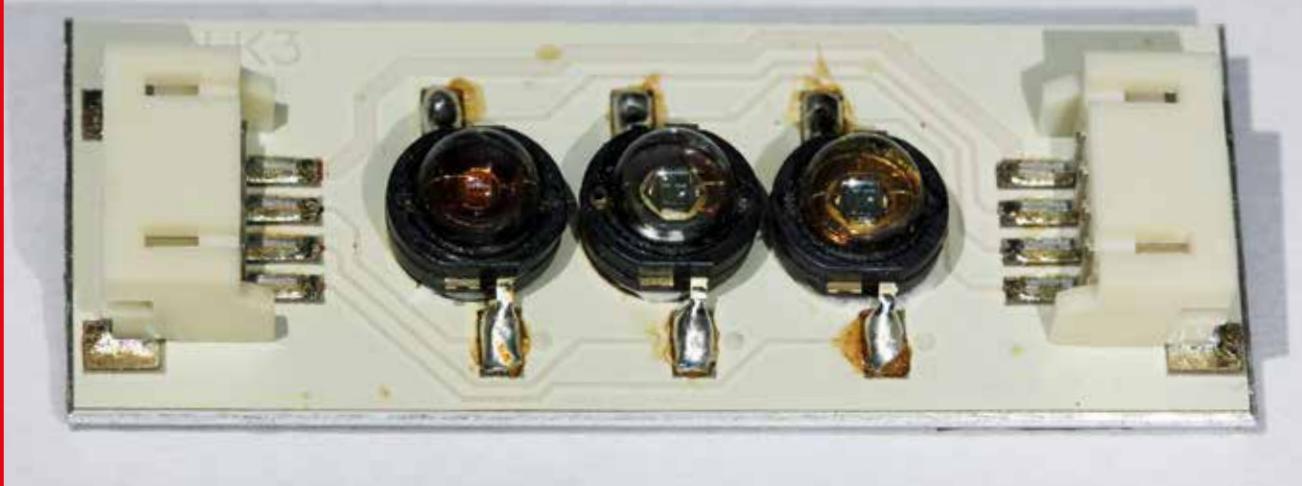
An interesting alternative to polymer-dispersed phosphors are luminescent ceramics. They can be manufactured impermeable, provide a 30 times higher thermal conductivity and are chemical, mechanical and temperature resistant. Furthermore they can be manufactured by sintering in desired size and shape. Beyond that, optical functionalization of the surfaces and volume scattering allow the conversion efficiency and emission characteristic to be tailored to LED applications. This provides entirely new opportunities for the manufacturing of white LEDs. To facilitate these, the Fraunhofer-internal alliance

»The combination of luminescent ceramics with new packaging techniques now enables robust, durable and color stable LEDs even for the toughest applications.«

Michael Kunzer, group »LED Modules«.

or in a lens above the chip. Continuous improvements of the LED chips enable current and luminance densities, which lead to an extreme photo-thermal stain of the phosphor converter even without external influences. Furthermore, the polymer matrix itself has low mechanical and thermal reliability and is permeable for humidity and gases. High ambient temperatures or penetrating pollutants can then accelerate browning and corrosion inside the LED package (Fig. 2). This reduces the lifetime and causes color shifts, which the eye can easily recognize. The silver reflectors inside the package and chip are particularly sensitive in this respect.

HeraKLED (Hermetically sealed, luminescent ceramics for LEDs) with the Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems IKTS has been formed. The Fraunhofer Institute for Reliability and Microintegration IZM is associated to develop new packaging technologies. The team develops LEDs which use luminescent ceramics as hermetic, light converting cap material. Since pollutants cannot penetrate inside and give rise to corrosion, a direct application of these new LEDs without elaborate external housing in chemical burdened environments is possible. As a further advantage the inevitable heat generated by the light conversion is dissipated through the thermally conductive ceramics itself, rather than further burdening the LED chip. This allows high ambient temperature operation. Furthermore, the developed package technology allows long device lifetimes with low color drift by completely avoiding polymers.



2

2 LEDs in polymer package degraded by corrosion and browning.

Durch Korrosion und Vergilbung angegriffene LEDs in Polymer-Gehäuse.

Leuchtkeramiken und neue Gehäusetechniken

Eine interessante Alternative zu polymergebundenen Leuchtstoffpulvern stellen Leuchtkeramiken dar. Diese sind gasdicht herstellbar, haben eine etwa 30-fach höhere Wärmeleitfähigkeit und sind chemisch, mechanisch und thermisch stabil. Ferner lassen sie sich in gewünschter Form und Größe durch Sinterung herstellen. Durch optische Funktionalisierung der Oberfläche und Volumenstreuung kann die Konversionseffizienz und Abstrahlcharakteristik gezielt auf LED-Anwendungen abgestimmt werden. Für die Herstellung weißer LEDs ergeben sich dadurch völlig neue Perspektiven.

Um diese zu ermöglichen kooperiert das Fraunhofer IAF mit dem Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS im Rahmen der wirtschaftsorientierten strategischen Allianz HeraKLED (Hermetisch abschließbare, lumineszierende Keramiken für LEDs). Zur Erarbeitung neuer Gehäusetechnologien ist ferner das Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM beteiligt. Das Konsortium entwickelt LEDs, bei denen die Leuchtkeramik als hermetisch dichtes, optisch konvertierendes Abschlussfenster verwendet wird. Da Schadgase nicht mehr im Innern der LED angreifen können, ist ein direkter Einsatz dieser neuartigen LEDs ohne aufwendige Umhausung in chemisch aggressiver Umgebung möglich. Ein weiterer Vorteil liegt in der Abführung der bei der Lichtkonversion unvermeidlich entstehenden Wärme über die gut thermisch leitfähige Leuchtkeramik selbst, statt wie jetzt üblich, den LED-Chip zusätzlich zu belasten. Dies erlaubt einen Betrieb bei erhöhten Umgebungstemperaturen. Weiterhin verzichtet die entwickelte Gehäusetechnik vollständig auf Polymere und ermöglicht so eine hohe Lebensdauer bei geringer Farbverschiebung.

5 x 10⁻⁹ m³/s
PACKAGE LEAKAGE RATE / GEHÄUSE-LECKRATE

We aim at a leakage rate of the LED package of less than 5 x 10⁻⁹ m³/s.

Wir verfolgen eine Leckrate des hermetisch dichten LED-Gehäuses von unter 5 x 10⁻⁹ m³/s.

EFFICIENT SEMICONDUCTOR DISK LASERS FOR WAVELENGTHS $> 2 \mu\text{m}$

EFFIZIENTE HALBLEITER-SCHEIBENLASER FÜR WELLENLÄNGEN $> 2 \mu\text{m}$

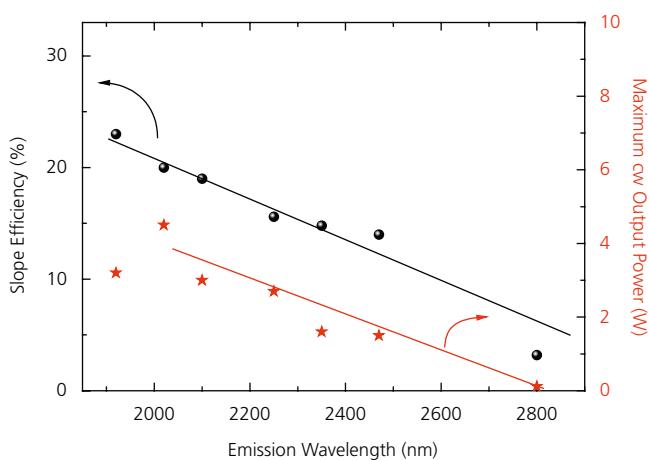
MARCEL RATTUNDE
marcel.rattunde@iaf.fraunhofer.de

For GaSb-based interband lasers, all reports show a decrease in laser performance with increasing emission wavelength so far. By optimizing the internal structure of semiconductor disk lasers, we are able to realize high-power, high-efficient devices with a uniform performance over a broad wavelength range from 2.0 to 2.5 μm .

By exploiting the (AlGaN)(AsSb) material system, light emitting devices in the 2 – 3 μm wavelength range can be fabricated. Several groups and companies, including the Fraunhofer IAF, have worked on diode-lasers, electrically-pumped VCSELs (vertical cavity surface emitting lasers) as well as optically-pumped SDLs (semiconductor disk lasers) using GaSb-based quantum well structures. The different semiconductor devices have distinct characteristics concerning e. g. output power, beam quality or spectral properties, but throughout the literature, one common feature can be found for all of them: The

»sweet spot« for the optimum laser performance of these GaSb-based lasers seems to be around 2.0 μm with the laser performance degrading severely when increasing the emission wavelength to 2.5 μm and above. For diode-lasers for example, this finding is reported independently by several groups [C. Lin et al., Appl. Phys. Lett. 84, 5088, 2004; L. Sheterengas et al., Semicond. Sci. Technol. 19, 655, 2004]. And also for the optically-pumped SDLs, the results at Fraunhofer IAF matched with the findings at the University of Tampere and with the IES group in Montpellier [M. Guina et al., Adv. in Opt. Technol. 2012, 265010, 2011; A. Laurain et al., IEEE Photon. Technol. Lett. 24, 246, 2012], showing a decrease in laser performance with increasing emission wavelength.

This is illustrated in Fig. 1, where the slope efficiency (black points) and maximum output power in continuous-wave (cw) operation (red stars) is plotted versus the emission wavelength of the semiconductor disk lasers fabricated at Fraunhofer IAF. All these devices are based on the same design (standard design) optimized for 980 nm diode-laser pumping, with GaInAsSb quantum wells as the active region. After MBE-growth, individual chips are cleaved from the wafers and bonded to an intracavity heatspreader made from silicon carbide (SiC) for heat-removal. All data shown here are recorded at 20 °C heatsink temperature in cw-operation. A linear-cavity with a 50 mm radius of curvature out-coupling mirror is used for characterization and the pump spot diameter is optimized for maximum output power. The lines in Fig. 1 (guide to the eyes) illustrate that the slope efficiency as well as the maximum output power are degrading almost linearly when increasing the emission wavelength from around 2.0 μm to 2.8 μm .



1 Slope efficiency (black points) and maximum output power (red stars) vs. the emission wavelength of standard semiconductor disk lasers fabricated at Fraunhofer IAF.

Kennlinien-Steigung (schwarze Punkte) sowie maximale Ausgangsleistung (rote Sterne) gegenüber der Emissionswellenlänge der Standard-Scheibenlaser-Strukturen.

Novel laser design to eliminate roll-off at longer wavelength

With a new design of the GaSb-based SDL structure developed recently, we are able to change this behavior drastically. This patent-pending structure is based on a different barrier-



2

2 Compact semiconductor disk laser gain-mirror setup at 2.5 μm .

Kompakter Aufbau des Scheibenlasers mit einjustierter Pumpoptik.

In Veröffentlichungen zu GaSb-basierten Interband-Lasern wird bisher übereinstimmend ein allgemeiner Trend beschrieben: Erhöht sich die Emissionswellenlänge, so sinkt die Effizienz dieser Laserstrukturen. Mithilfe eines optimierten aktiven Bereichs können am Fraunhofer IAF nun GaSb-Halbleiter-Scheibenlaser realisiert werden, die eine gleichbleibend hohe Effizienz sowie hohe Ausgangsleistung im gesamten Wellenlängenbereich von 2,0 – 2,5 μm aufweisen.

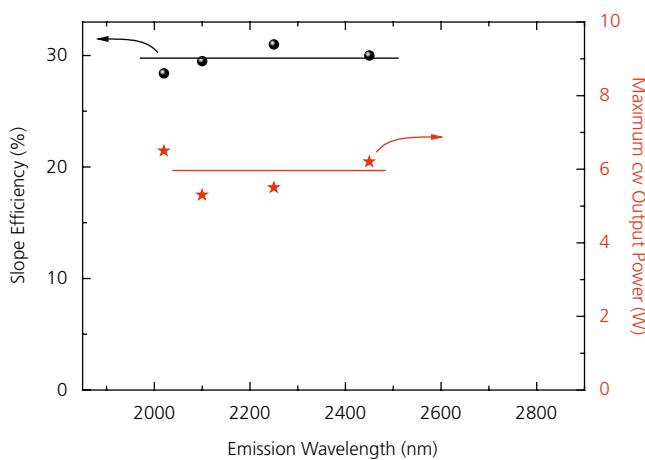
Mithilfe des (AlGaN)(AsSb) Materialsystems können Interband-Laser im Bereich von 2 – 3 μm realisiert werden. Verschiedene Firmen und Forschungseinrichtungen, darunter das Fraunhofer IAF, arbeiten an Diodenlasern, elektrisch gepumpten VCSELs (vertical cavity surface emitting laser) sowie optisch gepumpten Halbleiter-Scheibenlasern (semiconductor disk laser, SDL) basierend auf diesem Materialsystem. Die verschiedenen Bauformen der Laser unterscheiden sich dabei in spezifischen Details der Ausgangsleistung, Strahlqualität oder den spektralen Eigenschaften. Allen gemeinsam ist der generelle Trend, dass die Leistung und Effizienz der Laser bei einer Emissionswellenlänge um 2,0 μm am höchsten ist und dass diese Charakteristika für längerwellige Laser bei 2,5 μm und darüber hinaus deutlich abnehmen. Für Diodenlaser wurde dieses Verhalten von mehreren Gruppen beschrieben [C. Lin et al., Appl. Phys. Lett. 84, 5088, 2004; L. Shterengas et al., Semicond. Sci. Technol. 19, 655, 2004]. Auch für optisch gepumpte Halbleiter-Scheibenlaser decken sich die Ergebnisse am Fraunhofer IAF mit denen der Universität von Tampere sowie der Gruppe am IES in Montpellier [M. Guina et al., Adv. in Opt. Technol. 2012, 265010, 2011; A. Laurain et al., IEEE Photon. Technol. Lett. 24, 246, 2012].

Die Abnahme der Leistungsfähigkeit mit zunehmender Emissionswellenlänge ist in Abb. 1 für SDL-Strukturen gezeigt, die alle mit demselben Design (Standard-Design, optimiert für 980 nm Pumpdioden) realisiert wurden, nur mit unterschiedlicher Zusammensetzung der GaInAsSb-Quantentöpfe und daher unterschiedlicher Emissionswellenlänge. Nach dem MBE-Wachstum und dem Vereinzen des Wafers werden die Chips mit Silizium-Carbid (SiC)-Wärmespreizern verbunden und in eine Kupfer-Wärmesenke integriert. Die SDL-Strukturen werden in einem linearen Resonator (50 mm Krümmungsradius des externen Spiegels) bei 20 °C Wärmesenken-temperatur im Dauerstrichbetrieb (continuous wave, CW) betrieben und der Resonator sowie der Pumpspot-Durchmesser werden auf maximale Ausgangsleistung optimiert. Abb. 1 zeigt, dass sowohl die Leistungseffizienz (schwarze Punkte) als auch die maximale Ausgangsleistung (rote Sterne) annähernd linear mit der Emissionswellenlänge der SDL-Strukturen sinken.

Neues Laser-Design für eine gleichbleibend hohe Effizienz

Mit einem neuen Ansatz im Design des aktiven Bereichs der SDL-Strukturen konnten wir dieses Verhalten drastisch verbessern. Die Laserstrukturen (zum Patent angemeldet) basieren auf einem geänderten Barrieren-Material sowie stark verspannten Quantentöpfen. Bisher wurden

material and highly strained quantum-wells. So far, SDLs emitting up to $2.5 \mu\text{m}$ are realized with this new design and the results are shown in Fig. 3. The mounting technology (SiC heatspreader) and operation conditions were the same as for the previous samples shown in Fig. 1. The slope efficiency reaches a high value of around 30 % and is independent of the emission wavelength and also the maximum output power shows no sign of decrease with increasing wavelength. Besides that, the absolute values for both parameters are much higher for this new design than those achieved with the standard design shown in Fig. 1 (note that both figures share the same absolute scale). It waits to be seen if this excellent performance can be maintained also for emission wavelength above $2.5 \mu\text{m}$, as the fundamental limitations of the long-wavelength GaInAsSb quantum well emitters (reduced valence band offset and increasing Auger coefficient) cannot be suppressed completely.



3 Results of the novel design for the semiconductor disk laser structure. In contrast to the results in Fig. 1, the slope efficiency and output power are almost independent of emission wavelength and the absolute values are much higher.

Laserstrukturen mit dem optimierten Scheibenlaser-Design: In Gegensatz zu Abb. 1 ist die Steigung sowie die maximale Ausgangsleistung unabhängig von der Emissionswellenlänge der Laser.

First modules under evaluation

These results are of relevance not only for a better understanding of the underlying physical mechanisms inside the semiconductor structure but also for the application oriented current European research project NovIRLas (Novel IR-laser source for active spectroscopy and medical applications). One research stand within this project is the efficient pumping of ZGP (zinc germanium phosphide), a non-linear optical material used for parametric generation of mid-infrared radiation. This material is usually pumped at $2 \mu\text{m}$, simply because efficient pump sources are available there. But there is a distinct benefit going to higher pump wavelengths, as the residual absorption inside ZGP drops with wavelength (e. g. at $2.5 \mu\text{m}$ the absorption coefficient is less than half of the value at $2.0 \mu\text{m}$). With our new SDL structures we can offer now pump sources for ZGP at the preferred wavelength of $2.5 \mu\text{m}$ without compromising pump-laser efficiency or maximum power. A UK-based company is incorporating these new SDL structures as gain-mirrors inside a laser cavity in order to develop a novel type of Optical Parametric Oscillator (OPO) based on ZGP for the $5 - 10 \mu\text{m}$ wavelength range. The compact setup for the SDL gain-mirror (i. e. SDL chip with adjusted pump-optics) at $2.5 \mu\text{m}$ emission wavelength can be seen in Fig. 2.

Apart from this application, Fraunhofer IAF is in close contact with other companies and research organizations in order to exploit the use of these new SDL structures for airplane security as well as for long-range optical measurement techniques. Further laser modules and test-setups have already been provided to partners for prototype demonstrations.

SDLs im Wellenlängenbereich bis 2,5 μm mit diesem neuen Design realisiert. In Abb. 3 sind die dazugehörigen Ergebnisse zu sehen, wobei die Proben sowohl mit der gleichen Aufbautechnik montiert als auch unter den gleichen Bedingungen wie die Proben in Abb. 1 charakterisiert wurden. Die Leistungseffizienz erreicht mit 30 % einen sehr hohen Wert und ist unabhängig von der Emissionswellenlänge. Ebenso zeigt auch die maximale CW-Ausgangsleistung keine Abnahme mit zunehmender Wellenlänge. Darüber hinaus sind die absoluten Werte in diesem Fall deutlich höher als bei den SDLs der Standard-Struktur (Abb. 1; beide Abbildungen sind gleich skaliert). Die für die Zukunft geplanten weiteren SDL-Strukturen werden zeigen, ob sich diese hervorragenden Leistungsdaten auch im noch längerwelligen Bereich $> 2,5 \mu\text{m}$ realisieren lassen. Komplett unterdrücken wird sich die Leistungs- und Effizienzabnahme mit zunehmender Wellenlänge auch mit dem neuen Design nicht; ab einem gewissen Punkt werden die fundamentalen physikalischen Verlustmechanismen (Auger-Rekombination sowie thermische Reemission von Ladungsträgern auf Grund des zu geringen Ladungsträgereinschlusses) auch hier einen messbaren Einfluss auf die Laserdaten zeigen.

Erste Module bei externen Partnern

Diese Ergebnisse sind nicht nur für ein besseres Verständnis der zugrundeliegenden physikalischen Mechanismen im aktiven Bereich der Laserstruktur von Bedeutung, sondern auch für das aktuelle anwendungsbezogene Europäische Projekt NovIRLas (Novel IR-laser source for active spectroscopy and medical applications). Ein Arbeitspaket innerhalb von NovIRLas ist die Entwicklung eines kompakten optisch-parametrischen Oszillators (OPO) basierend auf dem nichtlinear-optischen Material Zink-Germanium-Phosphid (ZGP). Auf Grund der bisherigen limitierten Auswahl an geeigneten Anregungslaserquellen wird ZGP bisher bei 2 μm optisch gepumpt. Allerdings wären größere Pumpwellenlängen vorteilhaft, da die intrinsischen Verluste von ZGP mit der Wellenlänge abnehmen (so ist bei 2,5 μm der Absorptionskoeffizient dieser Verluste um mehr als die Hälfte reduziert gegenüber dem Wert bei 2,0 μm). Durch unsere neuen SDL-Strukturen können wir nun Pumplaser für ZGP bei der bevorzugten Pumpwellenlänge von 2,5 μm anbieten ohne Kompromisse bei der Ausgangsleistung oder Effizienz eingehen zu müssen. Eine als Projektpartner an NovIRLas beteiligte Firma in Großbritannien arbeitet momentan an der Integration der SDL-Strukturen, die vom Fraunhofer IAF in Form aufgebauter SDL-Chips mit einjustierter Pumpoptik bereit gestellt werden (Abb. 2), um effiziente OPOs für den Bereich von 5 – 10 μm zu realisieren.

Neben dieser Anwendung ist das Fraunhofer IAF in Kontakt mit einem weiteren industriellen Partner sowie einer Forschungseinrichtung, um diese neuen SDLs im Bereich der Luftfahrt-sicherheit sowie IR-Messtechnik einzusetzen. Erste Lasermodule und Prototypen wurden auch hier bereits den Partnern zur weiteren Entwicklung zur Verfügung gestellt.

SEMICONDUCTOR SENSORS HALBLEITERSENSOREN

CHRISTOPH E. NEBEL
christoph.nebel@iaf.fraunhofer.de

Diamond as a bridge to quantum physics Diamant als Brücke zur Quantenphysik

»Quantum physics? We are currently working on diamond tips for the electron spin resonance spectroscopy in order to detect defective sectors on hard disks. These can then be excluded from reading and writing processes as a way to keep the hard drive intact. Besides the realization of such sensors, our aim is to develop the corresponding assembling and connecting technologies. This means that diamond tips have to be placed on a mount which is then build into the relevant instrument – for fast and automated measurements.«

Christoph Nebel, who is researching the characteristics of man-made diamond.

»Quantenphysik? Aktuell arbeiten wir an Diamantspitzen für die Elektronen-Spin-Resonanzspektroskopie, mit deren Hilfe zukünftig fehlerhafte Sektoren auf Festplatten erkannt und vom Lese- und Schreibvorgang ausgeschlossen werden sollen. So kann die Festplatte trotzdem funktionsfähig gehalten werden. Neben der Realisierung der Sensoren, geht es für uns darum, die entsprechende Aufbau- und Verbindungstechnik zu entwickeln. Also die Spitzen auf eine Halterstruktur zu bringen und in die entsprechenden Instrumente einzubauen – für schnelle und automatisierte Messungen.«

Christoph Nebel, der an den Eigenschaften von künstlichen Diamanten forscht.





SEMICONDUCTOR SENSORS HALBLEITERSENSOREN



Christoph Nebel

Head of Business Unit »Semiconductor Sensors«



Studies: Electrical engineering

**Habilitation: Optical
and electronic characteristics
of CVD diamond**

**Fraunhofer IAF staff member:
since 2008**

**Focus of research:
Diamond-based applications**

Mr. Nebel, in 2008 you took over the unit »Semiconductor Sensors« at Fraunhofer IAF. What has happened since then?

When I started at the IAF, the focus was placed on polycrystalline or nanocrystalline diamond layers entirely. About three and a half years ago, we then started our monocrystalline diamond activity; a promising material for optical and electronic applications. We are also taking a closer look at novel materials such as aluminum scandium nitride and graphene. Graphene is a promising metal substitute and can also be applied in the field of energy storages. So far, we are still at the very beginning of this research and we will later see how these materials are received on the market. Diamond, on the other hand, has by now shown its full potential. Here, the next challenge will be to develop monocrystalline diamond wafers and components.

Where do you see the possibility to build a bridge between your business unit and the industry?

Our expertise in the field of monocrystalline diamond deposition definitely bridges this gap. The development of thick, monocrystalline diamond layers about three years ago marks the beginning of this research. The fact that these films also attracted attention as jewels opened up a whole new market for us. This is when we began to optimize our reactors for the production of jewelry stones. In cooperation with an industry partner, the aim is to improve the recipe for our crystal growth to the point where the production of colorful diamonds becomes possible. The next step will be to realize diamond deposition reactors for the wafer production and then to transfer these to the industry.

Apart from jewel stones, how will we benefit from diamond in the future?

Since 2010 the focus has increasingly been placed on the exploration of the potential of diamonds regarding quantum physics. These efforts have been so successful that areas of application such as quantum cryptography, quantum computing or magnetometry advance within reach. For instance, we are currently working on a sensor system for magnetometric measuring devices. Quantum magnetometry is supposed to enable extremely high spatial resolutions. This way the measuring of a single electron or nuclear spin can be achieved.

In the future, what do you personally want to focus on in your position as head of business unit?

My new role as head of business unit will center around activities which aim at promoting industrial corporation. In parallel, I am looking forward to engaging more in thematic discussions again, in order to evaluate and push forward new topics and possibilities.

Herr Nebel, Sie haben 2008 die Abteilungs- und Geschäftsfeldleitung der »Halbleiter-sensoren« übernommen, was hat sich seither getan?

Als ich ans IAF kam, ging es ausschließlich um polykristalline und nanokristalline Diamantschichten. Vor dreieinhalb Jahren haben wir dann unsere Aktivitäten im Bereich des einkristallinen Diamanten gestartet. Ein vielversprechendes Material für optische und elektronische Anwendungen. Darüber hinaus forschen wir aber auch an neuen Materialien wie Aluminium-Scandium-Nitrid und Graphen. Graphen ist vielversprechend für den Metallersatz und findet auch Verwendung im Bereich von Energie-Speichern. Hier stehen wir noch am Anfang der Forschung und es gilt zu sehen, wie die Materialien am Markt ankommen. Diamant hingegen hat sein Potenzial mittlerweile gezeigt. Jetzt geht es darum, einkristalline Diamantwafer herzustellen und Bauelemente zu entwickeln.

Wo sehen Sie denn eine erfolgreiche Brücke, die Sie mit Ihrem Geschäftsfeld in die Industrie schlagen konnten?

Das ist sicherlich unsere Expertise auf dem Gebiet der einkristallinen Diamantscheidung. Los ging es vor gut drei Jahren mit der Entwicklung dicker, einkristalliner Diamantplättchen. Die stachen dann plötzlich auch als Schmuckstein ins Auge und es tat sich ein ganz neuer Markt für uns auf. In der Folge haben wir begonnen, unsere Reaktoren für die Schmuckproduktion zu optimieren. In Zusammenarbeit mit einem Industriepartner geht es nun darum, die Rezepte für das Kristallwachstum so zu verfeinern, dass bunte Diamanten möglich werden. Der nächste Schritt wird sein, Diamantscheidereaktoren für die Waferherstellung zu realisieren – und diese dann wiederum in die Wirtschaft zu transferieren.

Außer den Schmuckdiamanten, was wird uns Diamant in Zukunft ermöglichen?

Am Anfang ging es verstärkt um das quantenphysikalische Potenzial von Diamant. Das war so erfolgreich, dass Quantenkryptografie, -computing und auch die Magnetometrie als Anwendungsbereiche in greifbare Nähe rückten. Aktuell arbeiten wir an einer Sensorik für magnetometrische Messgeräte. Mit der Quantenmagnetometrie sollen extrem hohe Ortsauflösungen möglich werden, sprich ein einzelner Elektron- oder Kernspin wird messbar.

Worauf möchten Sie sich in Ihrer Position als Geschäftsfeldleiter zukünftig besonders konzentrieren?

Zukünftig wird es in meiner neuen Rolle als Geschäftsfeldleiter insbesondere darum gehen, unsere Aktivitäten in Richtung Industriezusammenarbeit auszurichten. Ich freue mich aber auch darauf, parallel dazu wieder stärker in die inhaltliche Diskussion einzusteigen, um neue Themen und Möglichkeiten beurteilen und vorantreiben zu können.

JEWELRY DIAMOND FROM PECVD REACTORS SCHMUCK-DIAMANT AUS PECVD-REAKTOREN

CHRISTOPH E. NEBEL
christoph.nebel@iaf.fraunhofer.de

Plasma reactor



- Plasma-enhanced CVD reactors for the production of man-made transparent and blue diamond gemstones
- Diamond polishing technology
- Diamond shaping by laser-cutting



Man-made diamond gemstones become more and more interesting for jewelry applications: The market shows a strong demand for transparent and colored diamonds. At Fraunhofer IAF, a unique plasma-enhanced CVD reactor (PECVD) type has been optimized which enables the growth of diamond on an area of 6 inch in diameter. In this reactor, 600 pieces of 3 mm x 3 mm diamond plates can be overgrown with two millimeter man-made diamond within about 10 days. The grown diamond will then be laser-cut from the seed diamond plates to be then processed to gemstones.

The global diamond jewelry market grows year by year by about 6 %. In 2014 it reached a total turnaround of about USD 179 billion. Although this market is dominated by natural diamond, man-made diamond is becoming an interesting material for this application. High pressure high temperature (HPHT) techniques are mostly applied to grow diamond for academic research. The through-put is however rather limited. Plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) is an alternative technique which is applied in a variety of universities or other research environments. Though, as the plasma is generated by microwave excitation, the volume of the plasma usually only measures a few cubic centimeters.



1 *Fancy-color gemstone diamonds.*

Diamant-Edelsteine in sogenannten »Fancy«-Farben.

Künstlicher (»man-made«) Diamant wird zunehmend für Schmuckanwendungen interessant, da auf dem Schmuckdiamant-Markt zurzeit viel mehr transparente und farbige Steine verkauft werden könnten als zur Verfügung stehen. Das Fraunhofer IAF hat einen weltweit einzigartigen Mikrowellen-Plasma-gestützten CVD-Reaktor (PECVD) entwickelt, der Diamant auf einer Grundfläche von 15 cm Durchmesser abscheiden kann. Dies bedeutet, dass z. B. gleichzeitig 600 Diamant-Plättchen mit 3 mm x 3 mm Grundfläche in nur 10 Tagen mit bis zu 2 mm dickem »man-made« Diamant überwachsen werden können. Die Diamantplättchen werden danach mithilfe eines Laser-Schneidegeräts zurückgewonnen.

Der globale Schmuckdiamant-Markt wächst von Jahr zu Jahr um etwa 6 %. Im Jahr 2014 wurde ein Gesamtumsatz von 179 Milliarden USD erreicht. Obwohl dieser Markt von natürlichen Diamanten dominiert wird, wird »man-made« Diamant für diese Anwendung immer interessanter. Die Hochdruck-Hochtemperatur (HPHT)-Technik dominiert bisher die Herstellung von künstlichem Diamanten für zumeist akademische Forschungsanwendungen. Die Produktionsmenge ist hier sehr begrenzt. Plasma-gestützte CVD-Verfahren (PECVD) stellen eine alternative Möglichkeit dar. Sie werden an verschiedenen Universitäten und Forschungseinrichtungen eingesetzt. Das Volumen des Plasmas im Reaktor ist hier aber meistens auf wenige Kubikzentimeter begrenzt.

Mikrowellen-Plasma-gestützte CVD-Reaktoren am Fraunhofer IAF

180 CARAT

**GROWTH /
WACHSTUM**

**180 carat can be
produced within
10 days.**

**Innerhalb von
10 Tagen können
180 Karat herge-
stellt werden.**

Zur Abscheidung von Diamant wurde am Fraunhofer IAF ein Mikrowellen-Plasma-gestützter CVD-Reaktor entwickelt, der die Deposition von Diamant auf Flächen mit bis zu 15 cm Durchmesser erlaubt. Um dies zu erreichen wird eine Mikrowelle mit der Frequenz von 915 MHz durch einen ellipsoiden Reflektor in die Plasma-Kammer eingestrahlt in dem sich ein Methan/Wasserstoff-Gemisch befindet. Unter Optimierung verschiedenster Parameter können Plasmen in großen Volumen erzeugt werden, die sehr stabile Entladungs-Eigenschaften aufweisen. Zur Herstellung von Schmuck-Diamant sind dies ideale Voraussetzungen, da in möglichst kurzer Zeit viele Diamanten hergestellt werden können. Der Reaktor ist weltweit einzigartig und wird momentan am Fraunhofer IAF weiter optimiert.



2

Microwave-assisted plasma CVD reactors at Fraunhofer IAF

To grow diamond on large wafers with up to 6 inch diameter, a special microwave-plasma-reactor has been designed and optimized at IAF. To achieve such large deposition areas, we use a microwave of 915 MHz frequency in combination with an ellipsoid microwave reflector system which guides the microwave into the plasma chamber to ignite a methane/

Fancy-color diamonds

Fancy-color diamonds in yellow, blue or red are of highest interest in jewelry applications as in nature, fancy-color diamonds are very rare. Therefore, they can be sold at 30 % higher prices than transparent diamond. Current activities at Fraunhofer IAF aim at growing blue diamond by adding boron as dopant element to diamond, at growing yellow diamond by using nitrogen and red by adding NV centers to the diamond.

» The reactor and diamond technologies at Fraunhofer IAF are unique and outmatch all competing activities worldwide. The transfer into production lines has been started and will help to utilize diamond beyond gemstone applications.«

Christoph Nebel, Head of Business Unit »Semiconductor Sensors«.

hydrogen gas mixture. To grow high quality diamond by use of this system, a variety of parameters have been optimized. The plasma is large with respect to dimensions and burns very stable over extended periods of time. These are perfect properties which are required to grow man-made diamond gemstones fast and in large quantity. This reactor type is unique with respect to other systems and will be further optimized for new requirements in diamond growth and technology.

The production kit

To be able to commercialize the Fraunhofer IAF man-made diamond growth technology two important technologies needed to be added. We developed and optimized a laser cutting schema to remove the initial diamond plate which can be then re-used as a substrate in subsequent growth cycles. We have also developed a chemo-mechanical polishing technique to smoothen the surface after laser-cutting (Fig. 2). Both technologies are combined with the PECVD reactor development to allow customers to produce man-made diamond with high through-put and low costs.



3

2 Chemo-mechanical polishing equipment at Fraunhofer IAF.

Chemo-mechanische Politur-anlage am Fraunhofer IAF.

3 Transparent man-made diamonds produced at Fraunhofer IAF.

Am Fraunhofer IAF hergestellte transparente Diamanten.

2 – 10 $\mu\text{m/h}$
GROWTH RATE /
WACHSTUMSRATE

With the Fraunhofer IAF technology between 2 to 10 μm of diamond can be produced per hour.

Mit der Technologie des Fraunhofer IAF können 2 – 10 μm Diamant pro Stunde gewachsen werden.

Farbiger Schmuck-Diamant

Für farbige Diamanten in gelb, blau oder rot gibt es eine große Nachfrage auf dem Schmuckmarkt, da sie sehr selten in der Natur vorkommen. Sie können zu einem signifikant höheren Preis als transparenter Diamant verkauft werden. Deshalb finden am Fraunhofer IAF Entwicklungsarbeiten zur Färbung von Diamant statt. Soll der Diamant blau werden, wird das Element Bor zum Methan/Wasserstoff-Plasma gemischt, gelb wird durch Zumischung des Elements Stickstoff erreicht und rot durch die Erzeugung von Stickstoff-Vakanz-Zentren im Diamanten.

Kombinierte Produktions-Techniken

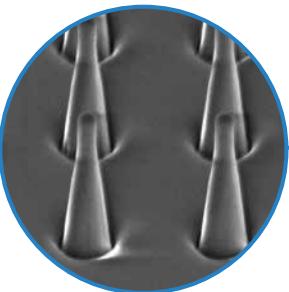
Um künstlichen Diamanten zu wachsen, werden Diamant-Plättchen benötigt, deren Anschaffung sehr teuer sein kann. Am Fraunhofer IAF wurde deshalb ein Laser-Schneide-Verfahren entwickelt, das es erlaubt, die Plättchen nach dem Überwachsen vom künstlichen Diamanten zu trennen und wiederzuverwenden. Die Diamant-Plättchen müssen entweder nach dem Erwerb oder spätestens nach dem Laser-Schnitt geglättet werden. Hierzu wurde am Fraunhofer IAF ein chemo-mechanisches Polierverfahren optimiert, das gleichzeitig eine Vielzahl von Plättchen glätten kann (Abb. 2). Diese beiden Technologien in Kombination mit dem PECVD-Reaktor ermöglichen es, künstliche Diamanten mit hohem Durchsatz und geringen Kosten zu produzieren.

DIAMOND – MORE THAN A GEMSTONE

DIAMANT – MEHR ALS SCHMUCK

CLAUDIA WIDMANN
claudia.widmann@iaf.fraunhofer.de

Diamond AFM tip for sensing applications



- 200 nm diameter and 2 μm length
- Implanted single NV center
- Nanoscale imaging of external electric and magnetic fields



The nitrogen vacancy center (NV center) is a color center in diamond. Due to the strong confinement of the magnetic dipole moment of its electron spin to 1 nm³, magnetic field measurements with nanometer resolution and close proximity to the sample are possible. A diamond magnetometer offers a sensitivity of 10^{-10} THz^{1/2} and a spatial resolution of 20 nm, while other existing magnetometers with higher sensitivity have a spatial resolution between 200 nm and 10 μm . The improved sensitivity and resolution can be exploited for applications in the area of information storage and biomedical studies.

Diamond is used in a wide range of applications. In addition to the well known uses like diamond as abrasive material, other remarkable physical properties of the material enable new fields in the area of sensing. Naturally occurring color centers, caused by the incorporation of foreign atoms, can serve as single photon emitters or lead to a sensitivity to electric and magnetic fields. One of the best studied color centers is the nitrogen vacancy center (NV center). By deliberately creating these centers in the lab, magnetometric sensors with high spatial resolution can be developed.

Diamond for sensing

Within the scope of the EU-project DIADEMS (Diamond devices enabled metrology and sensing), Fraunhofer IAF develops a magnetometric sensor for the detection of single nuclear



1 *Diamond AFM tips enable the detection of external single electron and nuclear spins at high sensitivity and spatial resolution.*

Diamant-AFM-Spitzen ermöglichen die Detektion einzelner Elektronen- und Kernspins mit hoher Empfindlichkeit und hoher räumlicher Auflösung.

Das Stickstoff-Vakanz-Zentrum ist ein Farbzentrum im Diamant. Aufgrund der starken Begrenzung des magnetischen Dipolmoments der Elektronenspins auf 1 nm^3 sind Magnetfeldmessungen mit Nanometer-Auflösung in nächster Nähe zur Spitze möglich. Ein Diamant-Magnetometer bietet eine Empfindlichkeit von $10^{-10} \text{ THz}^{-1/2}$ und eine räumliche Auflösung von 20 nm, während andere Magnetometer mit hoher Empfindlichkeit eine räumliche Auflösung zwischen 200 nm und 10 μm erzielen. Die verbesserte Empfindlichkeit und Auflösung kann für Anwendungen auf den Gebieten der Informationsspeicherung und Biomedizin ausgenutzt werden.

Diamant wird in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt. Zusätzlich zu den bekannten Anwendungen, z. B. als Schleifmittel, ermöglichen die bemerkenswerten physikalischen Eigenschaften des Materials neue Anwendungsgebiete im Bereich der Sensorik. Natürlich vorkommende Farbzentren im Diamant, erzeugt durch den Einschluss von Fremdatomen, können als Einzelphotonen-Emitter dienen oder eine Empfindlichkeit gegenüber magnetischen und elektrischen Feldern zeigen. Eines der am besten erforschten Farbzentren ist das Stickstoff-Vakanz-Zentrum (NV-Zentrum). Durch die bewusste Erzeugung dieser Zentren im Labor können magnetische Sensoren mit hoher räumlicher Auflösung entwickelt werden.

Diamant für Sensoren

**10^{-10}
THz^{-1/2}**
**SENSITIVITY /
EMPFINDLICHKEIT**

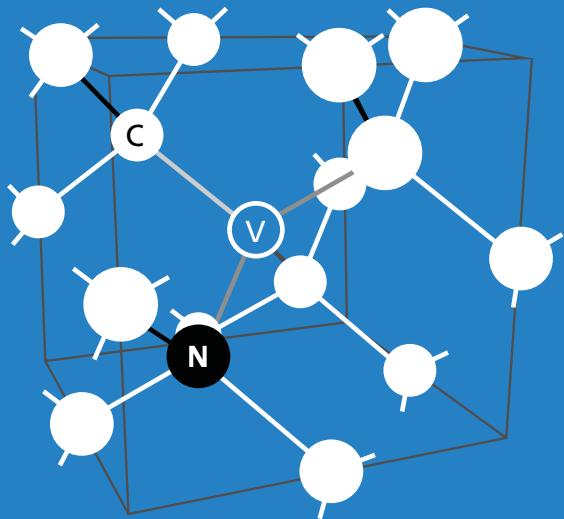
Diamond AFM tips with single NV center show an extremely high magnetic sensitivity.

AFM-Spitzen aus Diamant mit einem einzelnen NV-Zentrum zeigen eine extrem hohe Empfindlichkeit für magnetische Felder.

Im EU-Projekt DIADEMS (Diamond devices enabled metrology and sensing) entwickelt das Fraunhofer IAF einen magnetischen Sensor für die Detektion von einzelnen Kernspins. Das Ziel der Forschung ist es, das Verhalten von einzelnen und von Ensembles von Atomen und Molekülen zu untersuchen. Alle Systeme, die im Rahmen des Projekts entwickelt werden, nutzen die außergewöhnlichen quanten-optischen Eigenschaften des negativ geladenen NV-Zentrums. Je nach Anwendung werden einzelne oder Ensembles von NV-Zentren in die AFM-Spitze integriert, die aus einkristallinem oder nanokristallinem Diamant besteht. Dieses Projekt befasst sich also mit Systemen, die auf atomarer oder molekularer Ebene arbeiten.

Das NV-Zentrum in Diamant

Das Diamant-Farbzentrum besteht aus einem im Diamantgitter substituierten Stickstoffatom (N) und einer benachbarten Vakanz (V). Die Alleinstellungsmerkmale dieses Defekts sind die Photostabilität, die optisch detektierbare magnetische Resonanz und die Möglichkeit der optischen Initialisierung und Detektion des Elektron-Spins. Mithilfe der konfokalen Lichtmikroskopie bei Raumtemperatur, können einzelne NV-Zentren im Diamant detektiert werden. Diese robuste Einzelphotonenquelle kann Anwendung in der Quantenkryptographie finden und zur Einzelphotonen-Interferenz verwendet werden. Aufgrund der bemerkenswerten Photostabilität



2

spins. The research targets the physical access and greater understanding of the behavior of a single atom or molecule as well as small ensembles of the same.

All the devices and systems developed in the framework of the project DIADEMS exploit the extraordinary quantum optical properties of the negatively charged NV center. Depending on the application, single or ensembles of NV centers are integrated into the very top of the diamond AFM tip which can be made of single crystalline or nanocrystalline diamond. Thus, the project deals with systems on an atomic and molecular scale.

»It is our aim to develop sensors that are able to detect magnetic fields from individual ion channels in cell membranes. A tool like this will allow biologists to gain a better understanding of transport processes into the cell.«

Claudia Widmann, group »Diamond«.

NV center in diamond

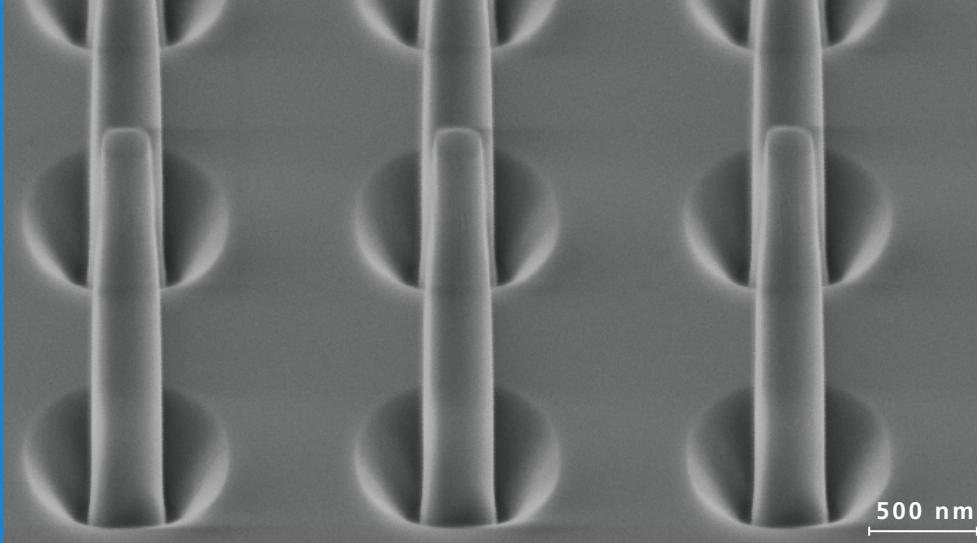
The NV color center in diamond consists of a substitutional nitrogen atom (N) associated with a carbon vacancy (V) in an adjacent lattice site of the diamond crystal. This defect exhibits extraordinary properties such as photostability and optical detected magnetic resonance as well as the possibility to optically initialize and read out its electron spins state. Using confocal optical microscopy at room temperature, we can easily detect the single NV center in diamond.

Being a robust solid-state single-photon source, the center can be used for quantum cryptography and single-photon interference. Owing to this perfect photostability at room temperature, NV defects hosted in nanodiamonds are now widely used as fluorescent labels for biological applications.

Scanning NV magnetometry and its applications

Scanning NV magnetometry can be considered a robust and powerful technique for nanoscale magnetic sensing. Today, the most successful and competitive approach towards nanoscale magnetometry consists of using monolithic, all-diamond scanning probe tips containing a single NV centre within ~ 10 nm from its end. Fabrication of such tips relies on highly sophisticated nanofabrication techniques.

By mounting these tips to an AFM cantilever, a sensitivity of 10^{-10} THz $^{-1/2}$ and a spatial resolution of 20 nm for the resulting magnetometric sensor can be achieved. The possible applications are represented in the sector of information technology. The sensor can be used for the calibration of write/read heads of hard disk drives, or the characterization of magnetic storage disks. According to Moore's law, the storage density of hard disk drives will approach 4 terabit/in 2 within the next years, i. e. those write/read heads need to become a few tens of nm in size in the next years.



3

2 Crystallographic structure of a nitrogen vacancy (NV) center, located in a single crystalline diamond lattice.

Kristallstruktur eines Stickstoff-Vakanzzentrums (NV) im einkristallinen Diamantgitter.

3 Scanning electron microscopy image of diamond tips.

Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer Diamantspitze.

bei Raumtemperatur werden NV-Zentren in Nanodiamanten nun als Fluoreszenzmarker für biologische Anwendungen eingesetzt.

NV-Magnetometrie und ihre Anwendungen

Die NV-Magnetometrie ist eine robuste und leistungsfähige Methode zur nanoskaligen Bestimmung von Magnetfeldern. Im Moment besteht der erfolgreichste Ansatz zur nanoskaligen Magnetometrie in der Verwendung von monolithischen Diamant-Rastersondenspitzen, die ein NV-Zentrum 10 nm unterhalb der Diamantoberfläche besitzen. Die Herstellung solcher Spitzen beruht auf hoch anspruchsvollen Nanofabrikationstechniken.

Durch die Anbringung dieser Spitzen an einem AFM-Cantilever kann eine Sensitivität von 10^{-10} THz $^{-1/2}$ und eine räumliche Auflösung von 20 nm erreicht werden. Mögliche Anwendungen finden sich im Bereich der Informationstechnologie. Dieser Sensor kann für die Kalibrierung von Schreib- und Leseköpfen in Festplattenlaufwerken oder für die Charakterisierung magnetischer Datenspeicher verwendet werden. Gemäß des Moore'schen Gesetzes wird die Speicherdichte in Festplatten in den nächsten Jahren auf einen Wert von 4 Terabit/Zoll 2 steigen, und somit müssen die Schreib- und Leseköpfe eine Größe von einigen zehn Nanometern erreichen.

20 nm

**SPATIAL
RESOLUTION /
RÄUMLICHE
AUFLÖSUNG**

Diamond AFM tips allow a spatial resolution of down to 20 nm during magnetic sensing.

Die AFM-Spitzen aus Diamant ermöglichen bei der Messung von magnetischen Feldern eine räumliche Auflösung bis zu 20 nm.

AlScN – A NEW PIEZOELECTRIC MATERIAL FOR HIGH FREQUENCY FILTERS

AlScN – EIN NEUES PIEZOLEKTRISCHES MATERIAL FÜR HOCHFREQUENZFILTER

AGNE ZUKAUSKAITE
agne.zukauskaite@iaf.fraunhofer.de

In a very short time, our communication systems have progressed from one-way radios to all-in-one mobile devices, where we can speak and listen simultaneously, as well as use GPS, Wi-Fi, 4G, and Bluetooth all at the same time. But this comes at a price. Each communication protocol requires a separate frequency band. And with continuously growing amounts of information we want to exchange, the need for higher frequency bands is growing every day. Can aluminium scandium nitride be the solution to this problem?

Piezoelectric materials are all around us. Their ability to convert electric voltage to mechanical vibrations, and mechanical load into electrical signal has many different applications, ranging from electroacoustic filters to biosensing and energy harvesting. Today, piezoelectric aluminum nitride (AlN) is one of the dominating materials in frequency filters for mobile communications due to good compatibility with Si-technology, high thermal stability, and high acoustic velocities. However, for

future applications, where higher frequencies are targeted, its relatively low electromechanical coupling and piezoelectric coefficient are limiting factors and alternatives are needed.

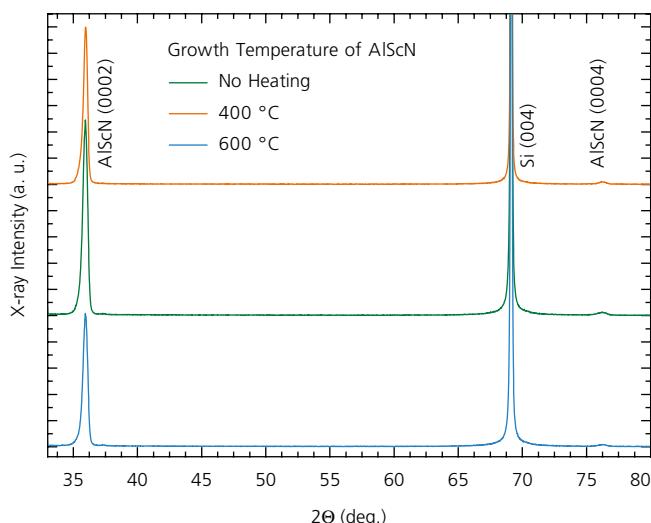
The »PiTRANS« project

Based on recent developments in next generation piezoelectric materials, the Fraunhofer Attract project »PiTRANS« was started at Fraunhofer IAF in early 2015. The main goal of this internal Fraunhofer funding scheme is to recruit young external scientists for the strategic development of new competencies. In the case of »PiTRANS« the aim is to design, optimize, and produce piezo-transducers, and to establish a technology platform based on aluminium scandium nitride (AlScN) and other compounds for the next generation micro-electro-mechanical systems (MEMS) operating in the 0.7 – 3 GHz frequency range.

The main motivation for the project is a recently published study where it was shown that AlScN has superior piezoelectric properties (up to 400 % increase in piezoelectric coefficient d_{33}) and higher electromechanical coupling than AlN. Today, the interest in replacing AlN with AlScN in next generation RF filter applications is high both within the scientific community and industry. Not only we would be able to transmit information more efficiently, but the improved material would also result in smaller devices that require less power.

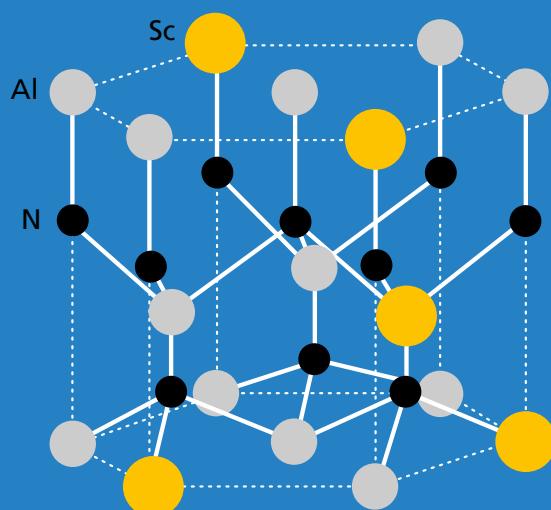
Material development

The piezoelectric properties of AlN come from its crystal structure and the dipole behaviour of the AlN bond. Wurtzite crystals can have a permanent dipole due to vertical asymmetry in the unit cell (Fig. 2). By alloying with Sc, we create an even more frustrated system that is more susceptible to deformation because metastable layered-hexagonal scandium nitride (ScN) is in competition with wurtzite AlN for bonding metal to nitrogen in a different way, causing



1 Comparison of AlScN grown at different temperatures and investigated by x-ray diffraction.

Vergleich der Röntgendiffraktion an AlScN, das bei verschiedenen Temperaturen gewachsen wurde.



2

2 Wurtzite crystal structure of piezoelectric AlScN.

Wurtzit-Kristallstruktur von piezoelektrischem AlScN.

Innerhalb kurzer Zeit haben sich unsere Kommunikationssysteme von Einweg-Funksystemen zu mobilen Komplettlösungen weiterentwickelt. Wir können gleichzeitig sprechen und hören, zugleich GPS, Internet, 4G und Bluetooth nutzen. Das hat auch seinen Preis: Jede Kommunikation benötigt ein eigenes Frequenzband. Mit den immer größeren Mengen an Daten, die wir austauschen, steigt der Bedarf an höheren Frequenzbändern. Kann Aluminiumscandiumnitrid die Lösung für dieses Problem bieten?

Die Fähigkeit piezoelektrischer Materialien, elektrische Ladung in mechanische Vibration und mechanische Belastung in elektrische Signale umzuwandeln, kommt ständig zum Einsatz – in elektroakustischen Filtern, in Biosensoren, bei der Energiegewinnung. Aufgrund der guten Kompatibilität mit Silizium-Technologien, der hohen thermischen Stabilität und der hohen akustischen Geschwindigkeit dominiert das piezoelektrische Aluminiumnitrid (AlN) in Frequenzfiltern für die Mobilkommunikation. Jedoch sind seine relativ geringe elektromechanische Kopplung und der relativ niedrige piezoelektronische Koeffizient limitierende Faktoren für Anwendungen, die höhere Frequenzen benötigen. Dafür müssen Alternativen geschaffen werden.

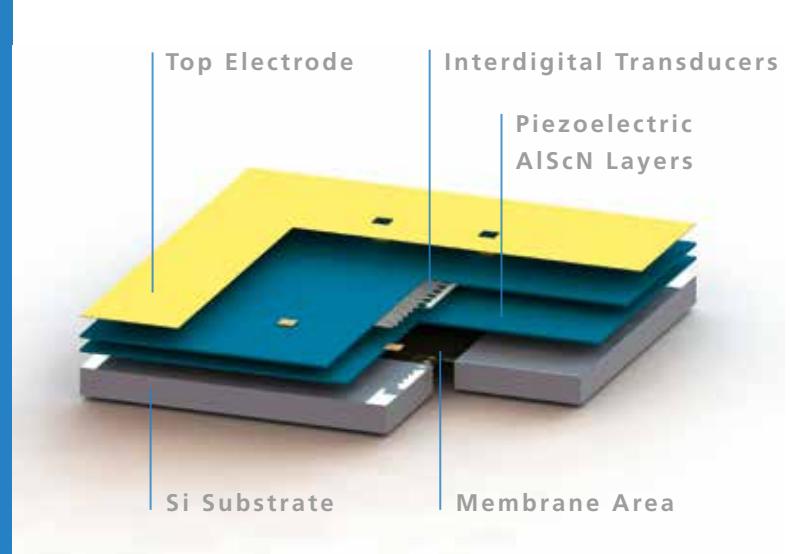
Das »PiTRANS«-Projekt

Um die nächste Generation von piezoelektrischen Materialien zu entwickeln, wurde das Fraunhofer-Projekt »PiTRANS« gestartet. Es hat zum Ziel, Piezo-Wandler zu entwerfen, zu optimieren und herzustellen sowie eine Technologieplattform basierend auf Aluminiumscandiumnitrid (AlScN) und anderen Verbindungen zu begründen, welche die Entwicklung der nächsten Generation mikroelektromechanischer Systeme für den Betrieb im Bereich 0,7 – 3 GHz verfolgt.

Die ausschlaggebende Motivation für dieses Projekt ist eine kürzlich veröffentlichte Studie, die belegt, dass AlScN bessere piezoelektrische Eigenschaften und eine höhere elektromechanische Kopplung als AlN besitzt. Sowohl die Wissenschaft als auch die Industrie haben ein großes Interesse daran, in der nächsten Generation von Hochfrequenz-Filteranwendungen AlN durch AlScN zu ersetzen. Damit wäre es möglich, Informationen effizienter zu übertragen und dabei kleinere Bauteile mit weniger Energiebedarf zu verwenden.

Materialentwicklung

Die piezoelektrischen Eigenschaften von AlN basieren auf seiner Kristallstruktur und auf dem dipolaren Verhalten der AlN-Verbindung. Wurtzit-Kristalle können aufgrund vertikaler Asymmetrie in der Elementarzelle (Fig. 2) einen permanenten Dipol besitzen. Durch den Einbau von Scandium (Sc) wird ein noch metastabileres System geschaffen, welches leichter zu deformieren ist: Das metastabile, hexagonale Scandiumnitrid (ScN) konkurriert mit dem wurtzitischen AlN um eine metallische Verbindung zum Stickstoff, was eine Schwächung der



3

the softening of the bonds. While this phenomenon has a positive effect on piezoelectric properties of AlScN, it also brings challenges. The parent binary materials AlN and ScN are most stable in different crystal structures – wurtzite and cubic, respectively, making AlScN a metastable material prone to phase separation. Wurtzite AlScN is piezoelectric, and according to mixing enthalpy calculations it is the most stable phase below 50 % Sc.

Reactive magnetron sputtering is a physical vapor deposition (PVD) technique well adapted for the synthesis of such metastable materials as the growth process is happening under non-equilibrium conditions, allowing to »freeze« the desired crystal phase during growth. This approach is especially attractive for creating ternary compound materials such as AlScN, thanks to the ease of exchanging single-element sources for an alloy, or even co-sputtering from two or more sources simultaneously.

Both alloy target and co-sputtering-based approaches for growth of ternary AlScN are currently under investigation. By carefully controlling the growth temperature, process gas composition, and other parameters we will be able to produce the high quality material with enhanced properties that is compatible with Si-based integrated circuits (IC) as add-on technology, same as AlN.

For example, we already know both from literature and our studies, that samples grown at substrate temperature of 400 °C show better crystalline quality than samples prepared at room temperature, but increasing the temperature further initiates the phase separation and elemental segregation processes in the films (Fig. 1).

Novel device structures

Parallel to material development, we are also focusing on adapting our established processing technologies for AlScN with different Sc concentrations. With the help of finite element modeling (FEM) we are investigating different device designs that would maximize the performance of the new high frequency filters. Today, at higher frequencies, dominating choice is bulk acoustic wave (BAW)-based components. However, recent studies show that membrane-based Lamb wave resonators (LWR) can be more efficient and also bring multiband re-configurability, leading to further decrease in a number of components. This new approach combines advantages of surface acoustic wave (SAW) and BAW resonators: the interdigital transducers (IDT) provide better tolerance for the imperfections, while the membrane ensures good compatibility with integrated circuit technology. In addition to possibilities for RF filter applications, the LWR design (Fig. 3) can also be adapted for chemical and biologic sensing in liquids – a topic actively researched at Fraunhofer IAF as well.

In conclusion, by combining our competences in material development, processing technologies, and microelectromechanical systems (MEMS) we are ready to take the next step towards better, smaller, and more efficient high frequency filters for tomorrow's mobile communication technologies.



4

3 Schematic representation of a Lamb wave resonator structure.

Schema einer Lamb-Wellen-Resonatorstruktur.

4 Sputtering tool (Evatec) dedicated to research and development of novel piezoelectric nitrides such as AlScN.

Sputteranlage (Evatec) für die Erforschung und Entwicklung von neuen piezoelektrischen Nitriden wie AlScN.

atomaren Bindung verursacht. Während dieses Phänomen positive Auswirkungen auf die piezoelektrischen Eigenschaften von AlScN hat, bringt es auch Herausforderungen mit sich. Die binären Grundmaterialien AlN und ScN sind in verschiedenen Kristallstrukturen thermodynamisch stabil – wurtzitisch und kubisch. Somit wird AlScN zu einem metastabilen Material, und damit anfällig für Phasentrennung. Das wurtzitische AlScN ist piezoelektrisch und, gemäß Mischungsenthalpie-Kalkulationen, die thermodynamisch stabilste Phase unterhalb von 50 % Sc.

Das reaktive Magnetron-Zerstäuben (Sputtern) ist eine Technik der physikalischen Gasphasenabscheidung (PVD), die gut für die Synthese solcher metastabiler Materialien genutzt werden kann. Zwei alternative Ansätze zum Wachstum von AlScN, sowohl durch Sputtern von Sinter-targets, als auch durch das Co-Sputtern von verschiedenen Targets, werden momentan evaluiert. Durch die genaue Kontrolle der Wachstumstemperatur, der Prozessgaszusammensetzung sowie anderer Parameter wird es möglich sein, ein hochqualitatives Material mit verbesserten Eigenschaften herzustellen. Dieses Material soll, wie auch das AlN, mit Si-basierten integrierten Schaltungen kompatibel sein.

Neuartige Bauteilstrukturen

Parallel zur Materialentwicklung passen wir unsere erprobten Prozesstechnologien auf AlScN mit unterschiedlichen Sc-Konzentrationen an. Mit einer Modellierung unter Nutzung der Finiten-Element-Methode (FEM) untersuchen wir verschiedene Komponentendesigns, welche die Leistung der neuen Hochfrequenzfilter steigern könnten. Bei immer höheren Frequenzen dominieren heute Komponenten auf Basis von akustischen Volumenwellen. Jedoch zeigen aktuelle Studien, dass die membranbasierten Lamb-Wellen-Resonatoren (LWR) eine höhere Effizienz sowie eine mehrwellige Rekonfigurierbarkeit ermöglichen, wodurch eine Reduktion der Anzahl der Komponenten erreicht wird. Dieser Ansatz kombiniert die Vorteile von Resonatoren, die oberflächenakustische (SAW) und volumenakustische Wellen nutzen: Die inter-digitalen Wandler bieten eine höhere Toleranz gegenüber technologischen Abweichungen, während die Membran die Kompatibilität mit den Technologien integrierter Schaltungen erleichtert. Zusätzlich zu Hochfrequenz-Filteranwendungen kann das LWR-Design (Fig. 3) auch für chemische und biologische Sensorik-Anwendungen in Flüssigkeiten angepasst werden – auch dies ist ein Forschungsgebiet, das derzeit am Fraunhofer IAF aktiv verfolgt wird.

Folglich verfügen wir durch die Kombination unserer Kompetenzen in den Bereichen der Materialentwicklung, Prozesstechnologie und mikromechanischer Systeme (MEMS) über alle nötigen Voraussetzungen, den nächsten Schritt auf dem Weg zu besseren, kleineren und effizienteren Hochfrequenzfiltern für die Mobilfunkkommunikation der Zukunft zu gehen.

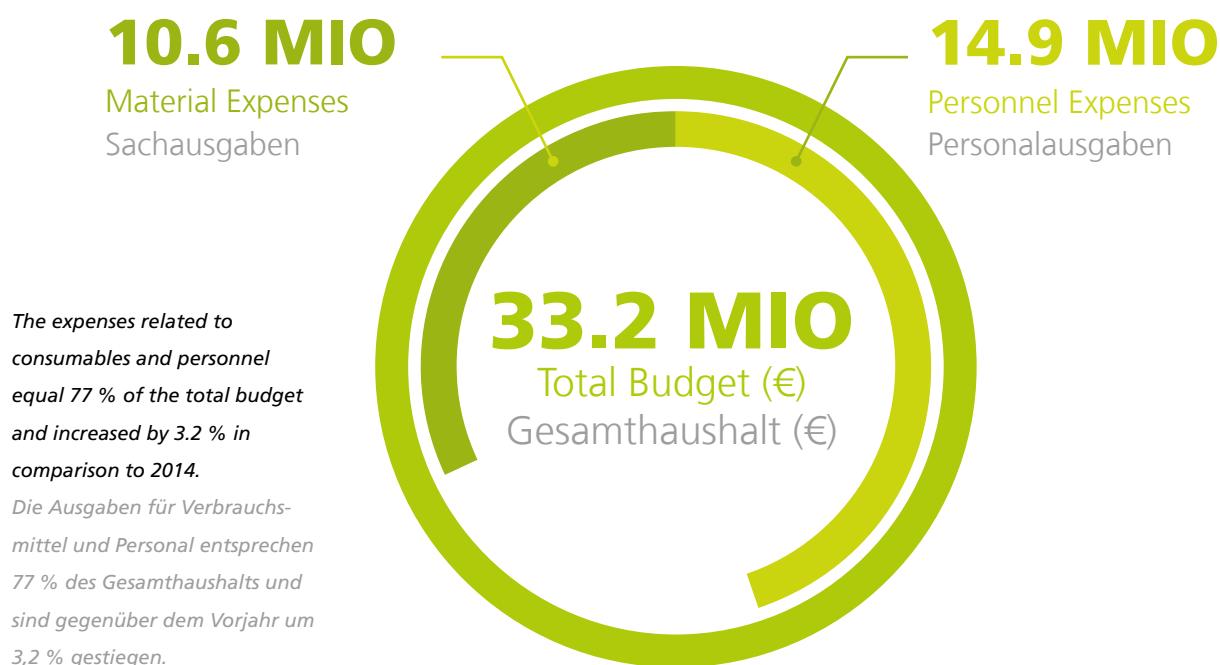
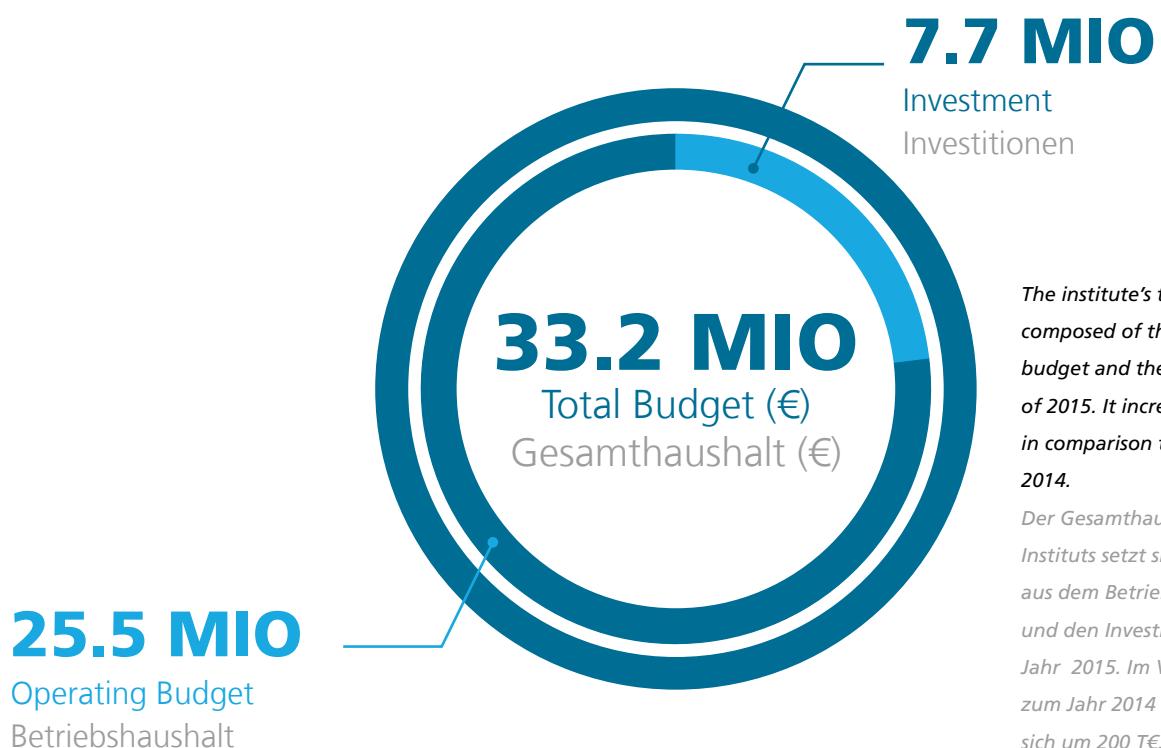
SUPPORTING BRIDGE PIERS

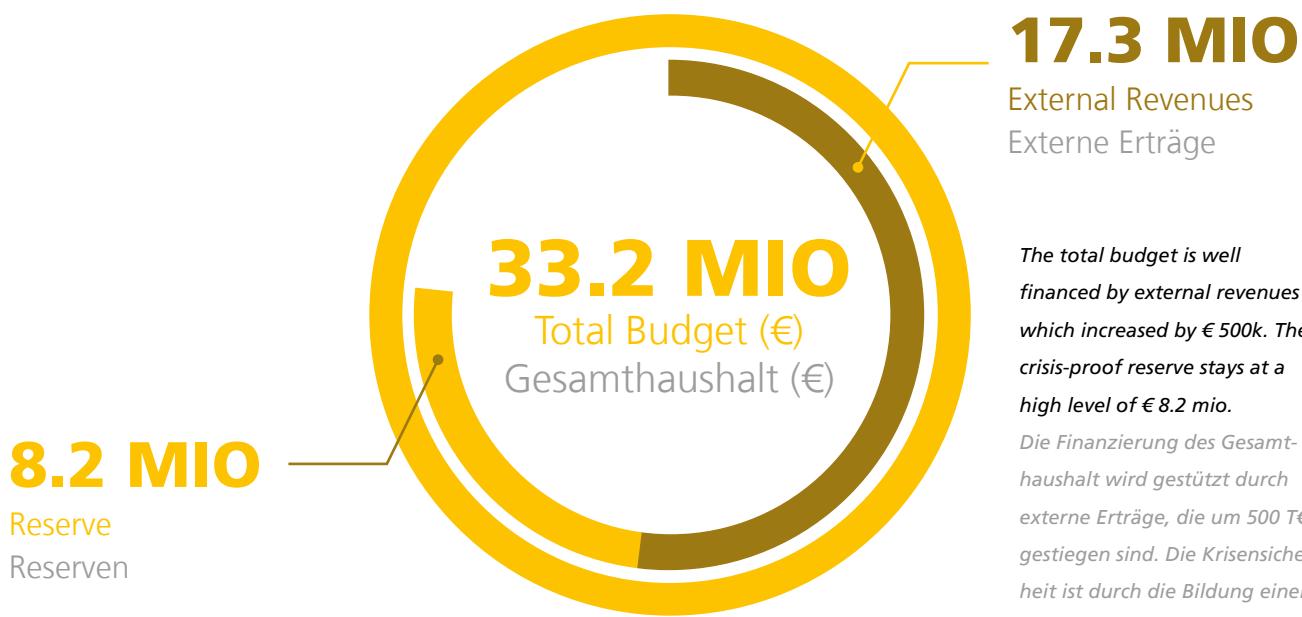
- 
- 110** **Institute in Figures**
Institut in Zahlen
 - 112** **Strategy 2016⁺**
Strategie 2016⁺
 - 114** **New Organizational Structure 2016**
Neue Organisationsstruktur 2016
 - 116** **Key Products**
Schlüsselprodukte
 - 118** **Award Winning Gallium Nitride:
Karl Heinz Beckurts Award**
Ausgezeichnetes Galliumnitrid:
Karl Heinz Beckurts-Preis
 - 120** **New Equipment for
Excellent Research**
Neue Anlagen für exzellente Forschung
 - 124** **Fairs and Events 2015**
Messen und Veranstaltungen 2015

- 
- 128** **Patents**
Patente
- 129** **Education and Teaching**
Ausbildung und Lehre
- 132** **Committees, Conferences, Fairs**
Gremien, Tagungen, Messen
- 135** **Awards and Guests**
Auszeichnungen und Gäste
- 136** **Publishing Notes**
Impressum

INSTITUTE IN FIGURES

INSTITUT IN ZAHLEN





STRATEGY 2016⁺

STRATEGIE 2016⁺

Where is Fraunhofer IAF headed? Are we covering the right topics? Do we possess the appropriate structures? Do we offer our customers unique advantages? Every five years we face these and other questions in an overarching strategy process. The result is then evaluated by a panel of industry, ministry, and university representatives as well as the Fraunhofer headquarter in a two-day audit.

2016 is, for many reasons, an important year for Fraunhofer IAF to address strategic questions. One of these is the restructuring of the organization into a complete matrix structure in which the business units and departments dynamically work together. Therefore, the future heads of the business units and departments were closely involved in the strategy process.

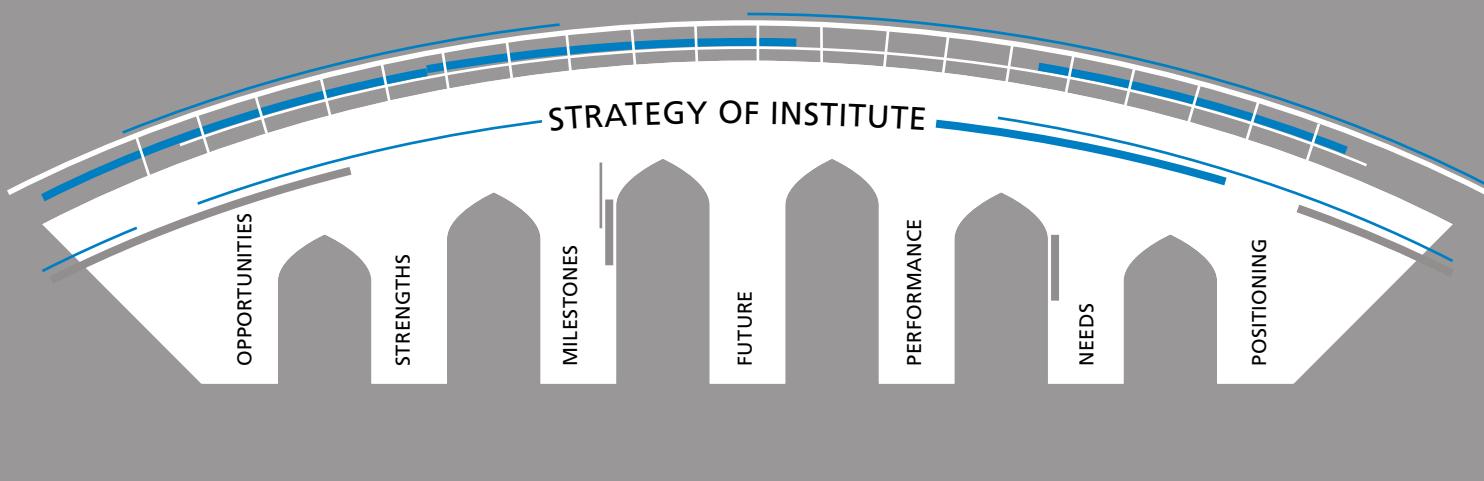
Within this context, the strategy means for us to take both a market- and a resource-oriented view. The business units, in their function as an interface between the institute and the customers, are analyzed in terms of whether their transfer of research results meets the needs, whether unique competitive advantages are discernible, and whether the research topics are oriented towards long-term growth markets. Our core competences are a visualization of the capabilities of Fraunhofer IAF. Excellence in know-how, equipment, technologies, and staff are key added values organized and combined in departments in order to differentiate ourselves from competitors. Administration, technical services and the groups

associated with the institute's management – marketing, public relations, information technology and quality management – also participate in the strategy process and work out measures on how to support the business units and departments of the institute in the best possible way.

In order to secure the future of the institute by an early detection and dynamic reaction to changes, we have identified three strategic objectives that we will actively pursue in the coming years:

- The consistent focus of our research and business units on the needs of our customers and the demands of the market.
- The development of the core competences of all departments towards higher added value in order to accomplish even the most challenging tasks.
- The establishment of robust technologies for system solutions and small series in support of various industries.

Of course, the strategy process is not completed with the documentation of the results. The audit in March 2016 is an opportunity for us to incorporate external stimuli into our planning. Then, we will start implementing the measures we have set ourselves. The annual update of our strategy allows us to track our target achievement. In summary, we are sure to continue to be a strong partner for our customers in industry, politics, and research.



Wohin geht das Fraunhofer IAF in den nächsten Jahren? Haben wir die richtigen Themen? Die richtigen Strukturen? Die richtigen Angebote? Alle fünf Jahre stellen wir uns diesen und weiteren Fragen in einem übergreifenden Strategieprozess. Das Ergebnis wird dann von einem Gremium aus Industrie-, Ministeriums-, Universitätsvertretern sowie der Fraunhofer-Zentrale in einem zweitägigen Audit evaluiert.

2016 ist aus vielen Gründen ein wichtiges Jahr für das IAF, um sich mit strategischen Fragestellungen auseinander zu setzen. Einer ist die Umstrukturierung der bisherigen Organisations- auf eine vollständige Matrix-Struktur, in der sich Geschäftsfelder und Abteilungen miteinander ver- netzen. Daher wurden die zukünftigen Führungskräfte eng in den Strategieprozess einbezogen.

Der Strategieprozess bedeutet für uns, sowohl eine markt- als auch eine ressourcenorientierte Sicht einzunehmen. Die Geschäftsfelder als Schnittstelle des Instituts zum Kunden werden im Hinblick darauf analysiert, ob ihre Forschungs-Transferleistungen die Bedürfnisse abdecken, ob eindeutige Wettbewerbsvorteile erkennbar sind und sie sich an langfristigen Wachstums- märkten ausrichten. Die Kernkompetenzen sind die Versinnbildlichung der Fähigkeiten des Fraunhofer IAFs. Exzellenz in Know-How, Equipment, Technologien und Personal sind wesent- liche Alleinstellungsmerkmale zur Abgrenzung gegen Wettbewerber, die in den Abteilungen des Instituts gebündelt sind. Auch die Verwaltung, die Technischen Dienste und die der Insti- tutsleitung zugeordneten Gruppen – Marketing, Öffentlichkeitsarbeit, Informationstechnik und Qualitätsmanagement – prägen den Strategieprozess und erarbeiten Maßnahmen, mit denen sie das Institut zielgerichtet unterstützen können.

Um die Zukunft des Instituts – durch ein frühzeitiges Erkennen und dynamisches Reagieren auf Veränderungen – zu sichern, haben wir drei strategische Ziele erkannt, die wir in den nächsten Jahren mit Nachdruck verfolgen werden:

- Die konsequente Ausrichtung unserer Forschung und Geschäftsfelder auf die Bedürfnisse unserer Kunden und die Anforderungen des Marktes.
- Die Entwicklung der Kernkompetenzen aller Abteilungen in Richtung höherer Wertschöpfung, um komplexere Aufgabenstellungen zu bewerkstelligen.
- Die Etablierung robuster Technologien für Systemlösungen und Kleinserien zur Unterstützung der Industrie.

Der Strategieprozess ist mit der Dokumentation der Ergebnisse nicht abgeschlossen. Das Audit im März 2016 verstehen wir als Chance, externe Impulse in unsere Planung einfließen zu lassen. Danach geht es an die Umsetzung der erarbeiteten Maßnahmen. Die jährliche Fort- schreibung der Strategie erlaubt uns, die Zielerreichung zu beobachten. So sind wir sicher, auch künftig ein starker Partner für unsere Kunden in Industrie, Politik und Wissenschaft zu sein.

NEW ORGANIZATIONAL STRUCTURE 2016

NEUE ORGANISATIONSSTRUKTUR 2016





KEY PRODUCTS

SCHLÜSSELPRODUKTE

In 2015, three »key products« were defined, which formed the center of the marketing strategy: our laser systems for process and quality control, the diamond reactor developed at Fraunhofer IAF, as well as the W-band radar for Industry 4.0 applications. Coordinated activities in the fields of press and media, exhibitions and events as well as customer and partner cooperation supported the targeted marketing of these systems.

Lasers: The »Laser World of Photonics«, the world's leading trade fair for optics and photonics in Munich, formed the center of the communication strategy for Fraunhofer IAF's laser systems. A specially developed demonstrator for spectroscopy based on efficient quantum cascade lasers, as well as animation movies attracted many visitors to the exhibition booth and showed the advantages of the technologies developed at Fraunhofer IAF for in- and online process and quality monitoring. The trade fair presentation was accompanied by target-group focused press releases, receiving considerable media interest world wide. To support the initiation of new projects, a novel application laboratory for our semiconductor lasers was set up at Fraunhofer IAF. It enables customers and partners to conduct test measurements with our technologies and thus allows an on-site evaluation of their project plans with the experts of Fraunhofer IAF.

Diamond: In 2015, the key product diamond received a great deal of attention in the media: besides well-known newspapers and professional magazines, radio and TV broadcasters also picked up the topic. The press reports on the CVD reactors for the production of synthetic monocrystalline diamond, developed at Fraunhofer IAF, resulted in numerous requests from various industry branches.

Furthermore, a new research area was boosted through the funding of the Fraunhofer-Zukunftsstiftung: In a long-term cooperation with four other Fraunhofer Institutes, the researchers aim for the development of diamond-based power electronics, thus paving the way for new markets in diamond technology.

W-band radar: A new demonstrator for a precise distance measuring radar system awakened great interest among visitors of internal events at Fraunhofer IAF. In 2016, the new generation of the W-band radar will be in focus at our trade fair presentations, e. g. at Hannover Messe or Sensor+Test. The radar system showed in field tests that it is able to deliver precise measuring results with high accuracy and reproducibility, even under extreme conditions such as heat or visual obstructions through dust or smoke. In discussions with future partners, new application scenarios were defined, such as the sensitive distance measurement during loading processes on aircraft. A cooperation with the Baden-Württemberg Cooperative State University (DHBW) Lörrach is building a new bridge towards regional businesses for the common realization of networked sensor systems for Industry 4.0 applications.



2015 wurden am Fraunhofer IAF drei »Key Products« definiert, die im Fokus der Vermarktungsstrategie standen: unsere Lasersysteme für die Qualitäts- und Prozesskontrolle, der am Fraunhofer IAF entwickelte Diamantreaktor, sowie das W-Band-Radar für Industrie-4.0-Applikationen. Mit gezielt aufeinander abgestimmten Maßnahmen aus den Bereichen Presse- und Medien, Messen und Veranstaltungen sowie Kunden- und Partnerkooperation wurde die Vermarktung dieser Systeme gezielt gefördert.

Laser: Zentrum der Kommunikationsstrategie für die Lasersysteme des Fraunhofer IAF bildete die »Laser World of Photonics«, Weltleitmesse für Optik und Photonik in München. Ein eigens entwickelter Spektroskopie-Demonstrator auf Basis leistungsstarker Quantenkaskadenlaser sowie Animationsfilme zogen die Aufmerksamkeit der Besucher auf sich und zeigten die Vorteile der am Fraunhofer IAF entwickelten Technologien für Prozess- und Qualitätskontrollen im laufenden Betrieb. Flankiert wurde der Messeauftritt von zielgruppenspezifischer Pressearbeit, die weltweit auf großes mediales Interesse stieß. Zudem entstand am Fraunhofer IAF ein neues Applikationslabor für unsere Halbleiterlaser. Es bietet Kunden und Partnern die Möglichkeit, Probemessungen mit unseren Technologien durchzuführen und direkt vor Ort ihre Projektvorhaben mit den Experten des Fraunhofer IAF zu evaluieren.

Diamant: Das »Key Product« Diamant fand 2015 insbesondere in den Medien große Aufmerksamkeit: Neben renommierten Tageszeitungen und Fachzeitschriften griffen auch Fernsehen und Radio das Thema auf. Die Presseberichte über die am Institut entwickelten CVD-Reaktoren für die Produktion synthetischer einkristalliner Diamanten gaben Anlass für zahlreiche Anfragen aus verschiedenen Industriezweigen. Durch die Förderung der Fraunhofer-Zukunftsstiftung wurde zudem ein neuer Forschungsbereich angestoßen: In einer langfristigen Kooperation mit vier weiteren Fraunhofer-Instituten verfolgen die Forscher das Ziel, diamantbasierte Leistungselektronik zu entwickeln und somit neue Märkte für die Diamanttechnologie zu erschließen.

W-Band-Radar: Ein neu entwickelter Demonstrator eines Radarsystems zur präzisen Abstandsmessung weckte bereits bei internen Veranstaltungen das Interesse der Besucher am Fraunhofer IAF. 2016 soll die neue W-Band-Radargeneration im Fokus der Messeauftritte des Fraunhofer IAF stehen, beispielsweise auf der Hannover Messe und der Sensor+Test. In Feldtests zeigte das Radarsystem, dass es auch unter extremen Bedingungen wie Hitze und Sicht einschränkungen durch Staub oder Rauch präzise Messergebnisse mit hoher Genauigkeit und Reproduzierbarkeit liefert. In Gesprächen mit künftigen Partnern wurden neue Anwendungsszenarien diskutiert, wie die sensible Abstandsmessung bei Beladungsvorgängen an Flugzeugen. Eine Kooperation mit der Dualen Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Lörrach bildet zudem eine neue Brücke hin zu regionalen Unternehmen, um gemeinsam vernetzte Sensorsysteme für Industrie 4.0 zu realisieren.

AWARD WINNING GALLIUM NITRIDE: KARL HEINZ BECKURTS AWARD

AUSGEZEICHNETES GALLIUMNITRID: KARL HEINZ BECKURTS-PREIS

Prof. Dr. Oliver Ambacher, head of Fraunhofer IAF, was awarded the Karl Heinz Beckurts-Prize on December 8th in Berlin. With this award, the Beckurts Foundation acknowledged his contribution for the development of highly efficient power amplifiers based on the semiconductor gallium nitride for modern mobile communication base stations. Every year since 1989, the Karl Heinz Beckurts Foundation honors scientific and technical achievements, bringing significant impulses for the industrial innovation in Germany.

Smartphones and tablets have considerably changed our communication behavior in the last years: We are constantly online, we download information and send photos and videos all around the world. The rapid wireless transfer of ever increasing data amounts, however, requires energy-efficient communication technologies that transmit and retrieve our data into and out of the provider network via base stations and radio links. For this enormous data capacity Prof. Dr. Oliver Ambacher, in cooperation with project partners from industry, has developed power amplifiers, based on the novel semiconductor material gallium nitride, for mobile communication base stations and has brought them to market maturity.

»For LTE and the future 5G standard we need extremely fast and energy-efficient amplifiers. With its interesting physical properties, the novel semiconductor material gallium nitride is perfectly suited for this purpose«, explains Ambacher. With the help of the semiconductor material gallium nitride (GaN),

amplifiers for mobile communication, which are much more energy-efficient and bring higher performances than previous technologies, can be realized. As they allow for more operating frequencies, it is not only possible to increase the reach, but also the transferable data rate.

The special physical properties of GaN make it possible to reduce the energy demand of the mobile communication base stations down to a quarter. With GaN-based power amplifiers, it will be possible to increase the mobile communication network's efficiency so significantly, that for Germany alone 1.5 million tons of CO₂ can be saved each year. Additionally, GaN-based amplifiers are extremely »multiband-capable«: This means that the base station can send information to or receive information from all mobile communication users on all available frequency bands. The GaN-technology furthermore allows for savings in production and operation costs of the base stations.

That way, national and European network providers and suppliers remain competitive, securing and creating job opportunities for the location. For his pioneering scientific work, Prof. Ambacher was now awarded the Karl Heinz Beckurts-Prize, remunerated with 30,000 Euro. »This award is a great motivation for us and helps us in the search for new project partners. In cooperation with companies and based on the already achieved success, it is our aim to increase the frequency from 2.6 to 6 GHz and to further raise the output power of the GaN-based amplifiers«, states Ambacher.



Professor Dr. Oliver Ambacher, Leiter des Fraunhofer IAF, wurde am 08. Dezember 2015 in Berlin mit dem Karl Heinz Beckurts-Preis geehrt. Damit würdigte die Beckurts-Stiftung seinen Beitrag zur Entwicklung hocheffizienter Leistungsverstärker aus dem Halbleiter Galliumnitrid für moderne Mobilfunk-Basisstationen. Die Karl Heinz Beckurts-Stiftung zeichnet seit 1989 jährlich herausragende wissenschaftliche und technische Leistungen aus, die erkennbare Impulse für industrielle Innovationen in Deutschland liefern.

Smartphones und Tablets haben unser Kommunikationsverhalten in den letzten Jahren stark verändert: Wir sind ständig online, rufen Informationen ab und versenden Bilder und Videos rund um den Globus. Um immer größere Datenmengen drahtlos in immer kürzerer Zeit übertragen zu können, sind energieeffiziente Kommunikationstechniken gefragt, die unsere Daten über Basisstation und Richtfunk ins Anbieternetz übermitteln und wieder abrufen. Für diese enormen Daten-Kapazitäten hat Professor Dr. Oliver Ambacher in Kooperation mit industriellen Projektpartnern Leistungsverstärker auf Basis des neuartigen Halbleitermaterials Galliumnitrid (GaN) für Mobilfunk-Basisstationen entwickelt und zur Einsatzreife gebracht.

»Für den LTE- und künftigen 5G-Standard brauchen wir extrem schnelle und energieeffiziente Sendeverstärker. Das neuartige Halbleitermaterial Galliumnitrid ist mit seinen interessanten physikalischen Eigenschaften hierfür perfekt geeignet«, erklärte Ambacher. Mithilfe des modernen Halbleitermaterials Galliumnitrid lassen sich Sendeverstärker für den Mobilfunk realisieren, die wesentlich energieeffizienter und leistungsstärker sind als bisherige Technologien. Da höhere Betriebsfrequenzen möglich sind, kann neben der Reichweite auch die übertragbare Datenrate deutlich erhöht werden.

Die speziellen physikalischen Eigenschaften von GaN ermöglichen es, den Energiebedarf der Mobilfunk-Basisstationen auf ein Viertel zu reduzieren. Mit GaN-Leistungsverstärkern kann allein in Deutschland die Effizienz des Mobilfunknetzes deutlich erhöht werden, so dass sich pro Jahr 1,5 Millionen Tonnen CO₂ einsparen lassen. Zusätzlich sind GaN-Verstärker in hohem Maße »multibandfähig«: Dies bedeutet, dass die Basisstation auf allen verfügbaren Frequenzbändern Informationen an Mobilfunkteilnehmer sendet oder von ihnen empfangen kann. Die GaN-Technologie ermöglicht zudem Einsparungen bei den Fertigungs- und Betriebskosten der Basisstationen. So bleiben nationale und europäische Netzbetreiber und -ausrüster wettbewerbsfähig. Das wiederum sichert und schafft Arbeitsplätze am Standort. Für seine wegweisende wissenschaftliche Arbeit erhielt Professor Ambacher nun den mit 30.000 Euro dotierten Karl Heinz Beckurts-Preis. »Die Auszeichnung ist eine große Motivation für uns und hilft bei der Suche nach weiteren Projektpartnern. In enger Kooperation mit Unternehmen möchten wir auf Basis der bereits erzielten Erfolge die Frequenz von 2,6 auf 6 GHz sowie die Ausgangsleistung der GaN-Verstärker weiter erhöhen«, berichtet Ambacher.

NEW EQUIPMENT FOR EXCELLENT RESEARCH

NEUE ANLAGEN FÜR EXZELLENTE FORSCHUNG

Throughout the year 2015, the research infrastructure of Fraunhofer IAF was extended with new machines for improved production processes. The new plants build important pillars for the bridge to superior research and development results. We would like to thank the Fraunhofer Gesellschaft, as well as the Federal Ministry of Defense for the financial support for the extension of our research infrastructure.

Technical data

Technische Daten

- Laser power: 16 kW
Laser-Leistung: 16 kW
- Laser pulse duration < 70 ns
Laserpulsdauer < 70 ns
- Frequency: 9 kHz
Frequenz: 9 kHz
- Highly precise sample alignment
Hochpräzise Probenausrichtung
- Material loss during cutting < 2 %
Materialverlust beim Schneiden des Diamanten < 2 %
- Saving of polishing time and fluid
Einsparung von Politurzeit und -flüssigkeit

LASER CUTTER FOR DIAMOND

Since October, a new laser cutter provides optimized possibilities at Fraunhofer IAF for the high-quality processing of the monocrystalline diamond developed at the institute. The application of a high-performance frequency-doubled Nd:YAG Laser, as well as a connected offline programming system (OPS) allow for considerable time and cost savings in the entire process, while the resulting quality of the processed diamond is even improved in comparison to previous cutting possibilities. Due to a very low cut face roughness at only 2 % material loss, polishing time and fluid can be saved. The fully automated and highly precise polishing of the samples on the sample holder replaces tedious manual processes and allows for the simultaneous processing of multiple samples.

DIAMANT-LASERSCHNEIDER

Die neue Laserschneideanlage bietet am Fraunhofer IAF seit Oktober optimierte Möglichkeiten für die hochwertige Verarbeitung des am Institut erzeugten einkristallinen Diamanten. Der Einsatz eines hochleistungsfähigen frequenzverdoppelten Nd:YAG-Lasers, sowie ein angeschlossenes Offline-Programming-System (OPS) ermöglichen erhebliche Zeit- und Kosteneinsparungen im Gesamtprozess, während die Qualität des verarbeiteten Diamanten gegenüber den bisherigen Schneidemöglichkeiten erheblich steigt. Mit einer sehr geringen Schnittflächenrauigkeit bei nur 2 % Materialverlust können Politurzeit und -flüssigkeit eingespart werden. Die vollautomatisierte hochpräzise Ausrichtung der Proben auf dem Probenhalter ersetzt aufwendige manuelle Prozesse und ermöglicht die zeitgleiche Bearbeitung mehrerer Proben.



Mit neuen Anlagen für optimierte Fertigungsprozesse wurde die Forschungsinfrastruktur des Fraunhofer IAF im Jahr 2015 erweitert. Die neuen Anlagen bilden wichtige Pfeiler für die Brücke hin zu hochwertigen Entwicklungsergebnissen. Unser Dank gilt der Fraunhofer-Gesellschaft, sowie dem Bundesministerium für Verteidigung für die finanzielle Unterstützung zur Ausweitung unserer Forschungs-Infrastruktur.

VEECO K465i MOCVD

The new VEECO K465i MOCVD-plant facilitates the further improvement of the epitaxy at Fraunhofer IAF. With high crystal quality, AlGaN/GaN-based layer structures can be grown on large substrates. They serve as base material for future high performance transistors, high frequency circuits or voltage converters. An almost particle-free growth of the layer structures allows for a high reproducibility and harvest, even of thick GaN layers. The simultaneous growth on multiple substrates at a high wafer throughput allows for the fast production of high-quality heterostructures.

Die neue VEECO K465i MOCVD-Anlage ermöglicht die Weiterentwicklung der Epitaxie am Fraunhofer IAF. Unter Gewährleistung einer hohen Kristallqualität können AlGaN/GaN-basierte Schichtstrukturen auf großen Substraten gewachsen werden. Die auf Silizium-, Siliziumcarbid oder Saphirsubstraten epitaxierten Schichtstrukturen dienen als Ausgangsmaterial für künftige Hochleistungstransistoren, Hochfrequenz-Schaltungen oder Spannungswandler. Ein nahezu partikelfreies Wachstum der Schichtstrukturen ermöglicht eine hohe Reproduzierbarkeit und Ausbeute auch dicker GaN-Schichten. Das gleichzeitige Bewachsen mehrerer Substrate bei einem hohen Waferdurchsatz erlaubt die schnelle Produktion hochwertiger Heterostrukturen.



Technical data

Technische Daten

- Simultaneous growth on several substrates with large diameter (12 x 100 mm – 3 x 200 mm)
Gleichzeitiges Bewachsen von mehreren Substraten mit großem Durchmesser (12 x 100 mm – 3 x 200 mm)
- Batch operation through integrated automated transfer system
Batchbetrieb durch integriertes automatisiertes Transfersystem
- Constant cooled gas inlet, for operation at high growth temperatures
Konstant gekühlter Gaseinlass für hohe Wachstumstemperaturen
- Low-maintenance operation
Wartungsarmer Betrieb

EVATEC RADIANCE SINGLE MODULE MULTISOURCE

The new sputter system »Evatec radiance single module multisource« facilitates the reactive magnetron sputtering of nitride thin films based on aluminum nitride (AlN), serving the development of a novel technology for the deposition of thin aluminum scandium nitride (AlScN)-layers at Fraunhofer IAF, which will help to realize future microelectronic components for high frequency applications, e. g. for the next generation of mobile communication.

Mit der neuen Sputteranlage »Evatec radiance single module multisource« wird das reaktive Magnetron-Sputtern von nitridischen Dünnschichten auf Basis von Aluminiumnitrid (AlN) ermöglicht. Die Maschine dient der Entwicklung einer neuartigen Technologie zur Abscheidung von dünnen Aluminiumscandiumnitrid (AlScN)-Schichten am Fraunhofer IAF. Damit sollen künftig neuartige mikroelektromechanische Bauelemente für Hochfrequenz-Anwendungen erschlossen werden – beispielsweise für die nächste Generation des Mobilfunks.



Technical data

Technische Daten

- Substrate diameter of up to 200 mm
Substratdurchmesser bis 200 mm
- Substrate heater temperature up to 500° C
Substratheizer-Temperatur bis zu 500° C
- Layer thickness uniformity < 5 %
Schichtdickenhomogenität < 5 %
- Reactive pulsed DC co-sputtering from up to 4 sputter sources
Reaktives gepulstes DC Co-Sputtern von bis zu 4 Sputterquellen



ZEISS XRADIA 520 VERSA

The new X-ray microscope »Xradia 520 Versa« allows for a detailed analysis of nano- and microstructures. The respective structures are depicted in sub-micrometer resolution by means of X-rays. Also large samples can be analyzed in high resolution and at great working distance. Three-dimensional crystallographic information about texture and crystal structure facilitates detailed analyses of deformations and growth mechanisms of hetero structures relevant for devices. In future, this analytical tool could also contribute to the non-destructive characterization of macro- and microscopic epitaxial defects in superlattice infrared detectors processed at Fraunhofer IAF.

Technical data

Technische Daten

- Spatial resolution: 0.7 µm
Räumliche Auflösung: 0,7 µm
- X-ray tube voltage 30 – 60 kV, at 10 W maximum output power
Röntgenröhrenspannung 30 – 60 kV, bei 10 W maximaler Ausgangsleistung
- Various objectives with different magnification levels, combined with scintillators for high absorption contrasts
Mehrere Objektive mit verschiedenen Vergrößerungen, kombiniert mit Szintillatoren für hohen Absorptionskontrast
- Integrated diffraction contrast tomography
Integrierte Beugungskontrast-Tomographie

Das neue Röntgenmikroskop »Xradia 520 Versa« ermöglicht eine detaillierte Analyse von Nano- und Mikrostrukturen. Die zu analysierenden Strukturen werden mittels Röntgenstrahlung in Sub-Mikrometerrauflösung abgebildet. Ein integrierter Szintillationsschirm ermöglicht die Umwandlung der Röntgenstrahlen in sichtbares Licht, wodurch mittels einer optischen Linse auch große Proben mit hohen Auflösungen in einem großen Arbeitsabstandsbereich untersucht werden können. Weiterhin können durch dreidimensionale kristallographische Verfahren Informationen zur Textur, Kristallstruktur und zu Wachstumsmechanismen von Bauelementstrukturen gewonnen werden. Künftig könnte dieses Analyseverfahren auch zur zerstörungsfreien Charakterisierung makro- und mikroskopischer Epitaxie-Defekte in Übergitter-Infrarot-Detektoren des Fraunhofer IAF beitragen.

FAIRS AND EVENTS 2015

MESSEN UND VERANSTALTUNGEN 2015



SUMMER PARTY SOMMERFEST

On July 17th, the Fraunhofer IAF employees and their families celebrated a colorful party. Barbecue specialties and a mobile coffee bar created a relaxed atmosphere, which was complemented by happy sounds of the band »Charme und Melone«. Both young and old tried interesting physical experiments and not only the smallest party guests were happy about the cool down in the blow-up swimming pools.

Bei hochsommerlichen Temperaturen feierten die Fraunhofer IAF-Mitarbeiter mit ihren Familien am 17. Juli ein buntes Fest. Kulinarisches vom Grill und eine mobile Kaffeebar sorgten für eine entspannte Stimmung, die von fröhlichen Klängen der Freiburger Band »Charme und Melone« begleitet wurde. Jung und Alt versuchten sich an spannenden physikalischen Experimenten und auch die Abkühlung im Planschbecken erfreute nicht nur die ganz kleinen Partygäste.



BUSINESS RUN BUSINESS RUN

Together with 5500 running enthusiasts, ten teams of Fraunhofer IAF staff members participated in the Freiburg Business Run on June 11th. During the run, the 30 sportswomen and sportsmen of the institute showed that Fraunhofer IAF not only pursues its research with energy and zest, but that team spirit and motivation also facilitate the achievement of ambitious aims. The common success was celebrated in the stadium of the Freiburg soccer club after reaching the finishing line.

Gemeinsam mit 5500 laufbegeisterten Freiburgern gingen am 11. Juni zehn Teams der IAF-Mitarbeiter beim Freiburger Business Run an den Start. Beim gemeinsamen Lauf zeigten die 30 Sportlerinnen und Sportler des Instituts, dass am Fraunhofer IAF nicht nur mit Elan geforscht, sondern auch mit Teamgeist und Motivation anspruchsvolle Ziele erreicht werden. Nach dem Zieleinlauf im Stadion des Freiburger SC wurde der gemeinsame Erfolg gefeiert.



SEMICONDUCTOR PLATFORM HALBLEITER-PLATTFORM

From October 6th – 8th, the SEMICON Europe in Dresden offered a platform for new developments of the European semiconductor industry. On the common booth of the Fraunhofer Group for Microelectronics, Fraunhofer IAF presented its LED retrofit lamp, which convinced visitors of the performance and energy efficiency of the gallium-nitride-based driver electronics developed at Fraunhofer IAF.

Vom 06. – 08. Oktober bot die SEMICON Europa in Dresden eine Plattform für neueste Entwicklungen der europäischen Halbleiterindustrie. Auf dem Gemeinschaftsstand des Fraunhofer-Verbunds Mikroelektronik präsentierte das Fraunhofer IAF seine eigens entwickelte LED-Retrofit-Lampe, die mit der Energieeffizienz und Leistungsfähigkeit der am Fraunhofer IAF entwickelten Treiberelektronik auf Basis von Galliumnitrid überzeugte.

MICROSYSTEMS TECHNOLOGY 4.0 MIKROSYSTEMTECHNIK 4.0

From October 26th – 28th, stakeholders from industry, research and education all around microsystems and electronics came together on the 6th microsystems conference in Karlsruhe. Fraunhofer IAF presented technologies for future Industry 4.0 applications: the wireless data transfer with radio links, as well as efficient laser-based measuring systems by Fraunhofer IAF awakened the interest of the conference participants.

Auf dem 6. Mikrosystemtechnik-Kongress in Karlsruhe kamen vom 26. – 28. Oktober Akteure aus Industrie, Forschung und Bildung rund um Mikrosysteme und Elektronik zusammen. Das Fraunhofer IAF präsentierte dort Technologien für zukünftige Industrie 4.0-Anwendungen: Die drahtlose Datenübertragung per Richtfunk, sowie leistungsfähige laserbasierte Messsysteme des Fraunhofer IAF erweckten das Interesse der Kongressbesucher.



MINISTER'S VISIT MINISTERBESUCH

On May 22nd, the minister for finance and economy of Baden-Württemberg, Dr. Nils Schmid, visited Fraunhofer IAF. He came to officially launch the cooperation between the Baden-Württemberg Cooperative State University (DHBW) Lörrach and Fraunhofer IAF. Minister Nils Schmid welcomed the new bridge between education, research, and industry. After his short speech to the employees of Fraunhofer IAF, the minister visited, among others, the cleanroom, to get informed about the processes at the institute.

Am 22. Mai besuchte Baden-Württembergs Finanz- und Wirtschaftsminister Dr. Nils Schmid das Fraunhofer IAF. Anlass war der offizielle Start der Kooperation der Dualen Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Lörrach mit dem Fraunhofer IAF. Minister Nils Schmid begrüßte den Brückenbau zwischen Bildung, Forschung und Industrie. Nach einem Grußwort an die Mitarbeiter des Fraunhofer IAF informierte sich der Minister unter anderem im Reinraum über die Prozesse des Instituts.

INFRARED-MEETINGPOINT INFRAROT-MEETINGPOINT

For the 42nd time, the »Freiburg Infrared Colloquium« held at Fraunhofer IAF offered a platform for researchers, engineers and users of the infrared technology: from March 3rd – 4th, 100 international infrared experts gathered at Fraunhofer IAF. Approximately 40 contributions provided the opportunity for engaged discussions of the latest developments and application of the infrared technology in fields like security, medicine, or environment.

Bereits zum 42. Mal bot das Fraunhofer IAF mit dem »Freiburg Infrarot-Kolloquium« ein Forum für Forscher, Ingenieure und Anwender der Infrarot-Technologie: Vom 3. – 4. März kamen 100 internationale Infrarot-Experten am Fraunhofer IAF zusammen. Rund 40 Beiträge boten Raum für angeregte Diskussionen zu neuesten Entwicklungen und dem Einsatz der Infrarot-Technologie in Bereichen wie Sicherheit, Medizin oder Umwelt.



TANGIBLE RESEARCH FORSCHUNG ZUM ANFASSEN

In July, Fraunhofer IAF built a bridge between research and society in the middle of the city center of Freiburg: At the »Freiburg science market«, numerous visitors were drawn to the common booth of the five Fraunhofer-Institutes of Freiburg by interesting exhibits. Following the motto »tangible research«, visitors found out in experiments why thin diamond discs produced at Fraunhofer IAF can easily cut through ice blocks or what hides behind LED lamps of different colours.

Mitten in der Freiburger Innenstadt gelang dem Fraunhofer IAF im Juli der Brückenschlag zwischen Forschung und Gesellschaft: beim »Freiburger Wissenschaftsmarkt« lockten anschauliche Exponate große Besucherzahlen an den Gemeinschaftsstand der fünf Freiburger Fraunhofer-Institute. Unter dem Motto »Forschung zum Anfassen« erfuhren die Besucher, warum am Fraunhofer IAF hergestellte, dünne Diamantscheiben feste Eisblöcke zerteilen können oder was hinter verschiedenfarbigen LED-Leuchten steckt.

»LASER WORLD OF PHOTONICS« »LASER WORLD OF PHOTONICS«

On the world's leading trade fair for laser technology in Munich, Fraunhofer IAF presented the newly developed quantum cascade laser in action: visitors of the exhibition booth could see how different liquid substances were scanned by the mini-laser and recognized as well as analyzed by a specially developed software within a few milliseconds.

Auf der weltweit größten Fachmesse für Lasertechnologie in München präsentierte das Fraunhofer IAF den neu entwickelten Quantenkaskadenlaser in Aktion: Besucher am Messestand konnten mitverfolgen, wie verschiedene flüssige Substanzen von dem Mini-Laser vermessen und innerhalb weniger Millisekunden durch Abgleich mit der eigens entwickelten Software erkannt und analysiert wurden.

PATENTS

PATENTE

Granted Patents

Patenterteilungen

K. Köhler, S. Müller, P. Waltereit

Method For Determining The Structure of a Transistor

US 8,987,011 B2, 24.03.2015; USA (US)

J. J. Hees, C. Nebel, M. Wolfer

Fluoreszenzfarbstoff und Verfahren zu seiner Herstellung

DE 10 2013 222 931 B4, 08.10.2015; Deutschland (DE)

T. Lim, R. Aidam, L. Kirste, R. Quay

Halbleiterstruktur

EP 2 465 142, 11.11.2015; Europäisches Patent (EP)

C. Nebel, W. Müller-Sebert, C. Widmann, C. Schreyvogel, N. Lang
Substrathalter, Plasmareaktor und Verfahren zur Abscheidung von
Diamant

DE 10 2014 223 301.1, 26.11.2015; Deutschland (DE)

Patent Applications

Patentanmeldungen

C. Nebel, C. Widmann

Epitaktische Diamantschicht und Verfahren zu ihrer Herstellung

10 2015 200 692.1, 19.01.2015; Deutschland (DE)

R. Reiner

Schaltungsanordnung / Circuit Arrangement

14/636,531, 03.03.2015; USA (US)

T. Töpper, M. Rattunde, S. Kaspar, J. Wagner

Optisch gepumpter Halbleiter-Scheibenlaser /

Optically Pumped Semiconductor Disk Laser

15 159 088.2, 13.03.2015; Europäisches Patent (EP)

14/661,280, 18.03.2015; USA (US)

C. Nebel, W. Müller-Sebert

Beschichtungsanlage und Verfahren zur Beschichtung
PCT/EP2015/070184, 03.09.2015; Weltorganisation für
geistiges Eigentum (WO)

C. Nebel, W. Müller-Sebert, C. Widmann, C. Schreyvogel, N. Lang

Substrathalter, Plasmareaktor und Verfahren zur Abscheidung von

Diamant

14/937,359, 10.11.2015; USA (US)

242527, 10.11.2015; Israel (IL)

EDUCATION AND TEACHING

AUSBILDUNG UND LEHRE

Academic Lectures and Seminars

Vorlesungen und Seminare

Oliver Ambacher

Nanobiotechnologie;
Universität Freiburg/Br., SS 2015
Verbindungshalbleiter Mikrosysteme;
Universität Freiburg/Br., WS 2014/2015, WS 2015/2016

Joachim Wagner

Grundlagen der Halbleiterphysik;
Universität Freiburg/Br., WS 2014/2015, WS 2015/2016
Aktuelle Probleme der Festkörperphysik und der
Materialforschung;
Universität Freiburg/Br., WS 2014/2015, SS 2015, WS 2015/2016

Christoph Nebel

Solid State and Semiconductor Physics;
Universität Freiburg/Br., SS 2015
Master Online Photovoltaics;
Universität Freiburg/Br., SS 2015

Martin Walther

Quanteneffektbauelemente und Halbleitertechnologie;
Karlsruher Institut für Technologie KIT, SS 2015

Rüdiger Quay

RF and Microwave Circuits and Systems;
Universität Freiburg/Br., WS 2014/2015, WS 2015/2016
RF and Microwave Devices and Circuits;
Universität Freiburg/Br., SS 2015
Design Course: RF and Microwave Circuits and Systems;
Universität Freiburg/Br., SS 2015
Power Electronics: Devices and Concepts;
Universität Freiburg/Br., WS 2014/2015, WS 2015/16
Renewable Energy Management (REM) Elective Track
Energy Systems: Hardware and Control;
Universität Freiburg/Br., WS 2015/16

Lutz Kirste

Theory and Applications of X-ray Diffractometry;
Universität Freiburg/Br., WS 2015/2016

Doctoral Theses

Promotionen

Adeel Ahmad Bajwa

New Assembly and Packaging Technologies for High-Power and High-Temperature GaN and SiC Devices

Universität Freiburg

Philippe Dennler

Analysis of the Potential of Gallium Nitride Based Monolithic Power Amplifiers in the Microwave Domain with more than an Octave Bandwidth, Universität Freiburg/Br.

Nicola Lang

Kontaktlose Mikroschalter auf der Basis von Dünnschichten aus Aluminiumnitrid und nanokristallinem Diamant; Universität Freiburg/Br.

Markus Mußer

Field-Theoretical Analysis of the Micro-System: Gallium Nitride RF-Broad-Band High-Power Amplifier; Universität Freiburg/Br.

Dirk Schwantuschke

Modeling of Dispersive Millimeter-Wave GaN HEMT Devices for High Power Amplifier Design; Universität Stuttgart

Hans-Michael Solowan

Charge carrier dynamics in InGaN quantum wells: Stimulated emission depletion and lateral charge carrier motion; Universität Freiburg/Br.

Thomas Weig

Generation of optical ultra-short pulses in (Al,In)GaN laser diodes; Universität Freiburg/Br.

Diploma and Master Theses

Diplom- und Master-Arbeiten

Anli Ding

Photoelectron emission from diamond into buffer solutions, Universität Freiburg/Br.

Johannes Fries

Piezoelektrisch aktivierte AlN/SiN-Mikrolinsen, Universität Freiburg/Br.

Iyad Jadaa

Wireless W-band Gbit/s communication system with autonomous minimum power consumption, Universität Freiburg/Br.

Sebastian Krause

Investigations of Higher Order Doherty Amplifiers for High Power Efficiency AlGaN/GaN Amplifier Design, Universität Karlsruhe

Sarath Kundumattathil Mohanan

Low-Power Gigabit Multiplexer Design in SiGe BiCMOS Technology for High-Speed Data Communication, Universität Freiburg/Br.

Modashree Rangesh

Investigation of In-package Harmonic Matching for High Power-Efficiency AlGaN/GaN packaged Switch Mode Power amplifier design, Universität Freiburg/Br.

Jannik Richter

Doping and Electrical Properties of the Semiconductor Material AlGaN, Universität Freiburg/Br.

Maurits Verkerke

Carbon Doping and V-Pits in AlGaN / GaN HEMT Structures on Silicon, University of Twente

Bachelor Theses

Bachelorarbeiten

Simon Hofsäss

Fernfeldcharakterisierung an Hochleistungs-Quantenkaskadenlasern; Universität Freiburg/Br

Chiara Lindner

*Leistungsgrenzen von 1920 nm Halbleiter-Scheibenlasern;
Universität Freiburg/Br.*

COMMITTEES, CONFERENCES, FAIRS GREMIEN, TAGUNGEN, MESSEN

Committee Activities

Arbeit in Fachgremien

Oliver Ambacher

- *Board of Directors, Fraunhofer UK »Center for Applied Photonics CAP«, Strassclyde (UK), Member*
- *DFG-Fachkollegium 307 »Physik der kondensierten Materie«; Member*
- *Advisory Board Freiburger Materialforschungszentrum FMF, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Member*
- *Scientific Advisory Board Leibnitz-Institut für Analytische Wissenschaften ISAS, Dortmund; Vice Chairman*
- *Scientific Advisory Board KTD »Hardware Research & Technology«, Thales Group, Neuilly-sur-Seine (F); Member*
- *Conference Chair »Future Security – 11th Security Research Conference 2016«; Sensor Systems for Safety and Security*
- *Program Committee »6th International Symposium on Growth of III-Nitrides ISGN-6«; Member*
- *COMET Strategy Board, CTR Carinthian Tech Research, Villach, Austria; Member*

Martina Baeumler

- *International Steering Committee »International Conference on Defects-Recognition, Imaging & Physics in Semiconductors DRIP«; Member*
- *International Steering Committee »Expert Evaluation & Control of Compound Semiconductor Materials & Technologies EXMATEC«; Member*

Volker Cimalla

- *Program Committee »Solid-State Device Research Conference ESSDERC«; Member*

Michael Dammann

- *Technical Program Committee »European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis ESREF 2015«; Member*

Arnulf Leuther

- *Program Committee »Indium Phosphide and Related Materials IPRM 2015«; Member*

Michael Mikulla

- *Advisory Board »IAP 1 CapTech European Defence Agency«, Member*

Christoph E. Nebel

- *Advisory Board »International Conference on New Diamond and New Carbon«; Member*
- *Program committee »International Conference on Diamond and Carbon Materials«; Member*
- *Technical Advisory Committee »IDA Industrial Diamond Association of America«; Member*
- *Peer Review College »EPSRC Engineering and Physical Sciences Research Council UK«; Member*
- *Associate Editor »Journal of Diamond and Related Materials«*

Rüdiger Quay

- *IEEE Electron Devices Society Committee »Compound Semiconductor Devices and Circuits«; Member*
- *IEEE Technical Committee »MTT-6 Microwave and Millimeter-Wave Integrated Circuits«; Co-Chair*
- *EURAMIG European Radio and Microwave Interest Group; Core Group Member*
- *Program committee »GeMiC German Microwave Conference 2015«; Member*
- *Program committee »INMMiC International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits 2015«; Member*
- *Technical Program Committee »International Microwave Symposium IMS 2015«; Member*
- *Associate Editor »IEEE Electron Device Letters«*
- *Associate Editor »International Journal of Microwave and Wireless Technologies«*

Marcel Rattunde

- *Scientific Committee »3rd European Workshop on VECSELs«, Member*

Frank Rutz

- *Gremium »VDI/VDE-GMA Fachausschuss 8.16 Temperaturmessung mit Wärmebildkameras«, Member*

Michael Schlechtweg

- *Program Committee »European Microwave Week EuMW 2015«; Member*
- *Program Committee »GeMIC«; Member*
- *VDE-ITG, Fachausschuss »THz Funksysteme«; Member*
- *Sachverständiger bei der Evaluierung des Leibnitz-Instituts für Innovative Mikroelektronik (IHP)*

Joachim Wagner

- *Program Committee »Conference on Lasers and Electro-Optics – European Quantum Electronics Conference 2015«; Member*

Martin Walther

- *Program Committee »Infrared Sensors and Systems IRS² 2016«; Member*
- *Program Committee »International Symposium on Optronics in Defense and Security 2016«; Member*

Conference Organization

Tagungsorganisation

Martin Walther

42nd Freiburg Infrared Colloquium

Freiburg/Br., 3 – 4 March 2015

Ruediger Quay, Frank Sullivan Raytheon

International Microwave Symposium IMS 2015

*Workshop »T/R Module Panel Architecture and
Associated Technology«*

Phoenix, 17 – 22 May 2015

Rüdiger Quay, Roger Kaul, Nils Pohl

International Microwave Symposium IMS 2015

*Student Design competitions »SDC-6 Low-Noise Amplifier Module
with Positive Gain Slope«*

Phoenix, 17 – 22 May 2015

Ruediger Quay, Franz Dielacher

EUMW (EuMC) 2015

*Workshop »RF-Technologies on the Move: The Races of Integrated
mm-Wave Automotive Radar and Sensing Technologies«*

Paris, 7 – 10 September

Exhibitions and Fairs

Ausstellungen und Messen

Laser World of Photonics 2015

22 – 25 June, Munich

Freiburger Wissenschaftsmarkt 2015

10 – 11 July, Freiburg/Br.

European Microwave Week 2015

6 – 11 September, Paris

Semicon Europa 2015

6 – 8 October, Dresden

Sustainability Summit 2015

19 – 20 October, Freiburg/Br.

Mikrosystemtechnik-Kongress 2015

26 – 28 October, Karlsruhe

AWARDS AND GUESTS

AUSZEICHNUNGEN UND GÄSTE

Awards

Auszeichnungen

Prof. Dr. Oliver Ambacher

Karl Heinz Beckurts Award 2015

Taro Yoshikawa

Best Presentation Prize of the International Conference

on New Diamond and Nano Carbons 2015

*»Formation of mono-sized diamond nanoparticles on
silicon dioxide surfaces«*

Guest Scientists

Gastwissenschaftler

Beatriz Aja Abelan

Universidad de Cantabria (E)

Mikko Varonen

Aalto University (FI)

PUBLISHING NOTES

IMPRESSUM

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE FESTKÖRPERPHYSIK IAF

Tullastraße 72
79108 Freiburg, Germany
Tel. +49 761 5159-0
Fax +49 761 5159-400
info@iaf.fraunhofer.de
www.iaf.fraunhofer.de

Director

Prof. Dr. rer. nat. Oliver Ambacher

Public Relations

Michael Teiwes
Tel. +49 761 5159-450
Fax +49 761 5159-71450
michael.teiwes@iaf.fraunhofer.de

All rights reserved. Reproduction requires the permission of the director of the institute.

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck nur mit Genehmigung der Institutsleitung.

© Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF,
Freiburg 2016

Editorial Board

Redaktion

Oliver Ambacher, Ines Bott, Swenja Broschart,
Sandra Iselin, Sonja Kripendorf, Julia Roeder,
Michael Teiwes

Layout, Typesetting, Printing

Layout, Satz, Druck

netsyn, Joachim Würger, Freiburg

Concept, Layout, Graphics

Konzept, Layout, Grafiken

ressourcenmangel, Julia Behnke, Hamburg
ressourcenmangel, Udo Schumacher, Hamburg

Photos

Fotos

iStock.com/Tsisha (cover, inside of cover, p. 1);
iStock.com/alanphillips (pp. 4,5);
Achim Käflein (p. 8 bottom);
Punto Studio Foto – Fotolia.com (pp. 10,11);
Karin Jähne – Fotolia.com (pp. 12,13);
pixabay.com (pp. 14,15);
Markus Mainka – Fotolia.com (pp. 16,17);
Rolf Frei, Weil am Rhein (pp. 18,19);
iStock.com/Andrew Clelland (pp. 20,21);
3alexd/Creative RF/Getty Images (pp. 28,29);
industrieblick - Fotolia.com (pp. 33, 37);
VanderWolf Images - Fotolia.com (p. 39);
Westend61/Creative RF/Getty Images (pp. 44,45);
verve - Fotolia.com (p. 49);
slavun - Fotolia.com (p. 53);
sdlgzps/Creative RF/Getty Images (pp. 60,61);
Andrey Armyagov - Fotolia.com (p. 69);
Westend61/Creative RF/Getty Images (pp. 76,77);
Swedish Defence Agency FOI (p. 81);
Günter Pilger, Essen (p. 85);
iStock.com/4X-image (pp. 92,93);
kavee - Fotolia.com (p. 97);
HZB / M. Setzpfandt (p. 119);
ZEISS (p. 123);
Fraunhofer ENAS (p. 125 right);
Fraunhofer IAP (Sandra Iselin, Oliver Korn, Liana Marek);
David Lohmüller (pp. 136, 137)

FAIRS AND CONFERENCES 2016

MESSEN UND TAGUNGEN 2016

SPIE PHOTONICS WEST,
SAN FRANCISCO, 13. – 18.02.2016

SPIE DEFENSE AND COMMERCIAL SENSING,
BALTIMORE, 17. – 21.04.2016

HANNOVER MESSE,
HANNOVER, 25. – 29.04.2016

SENSOR + TEST,
NUREMBERG, 10. – 12.05.2016

**INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEW
DIAMOND AND NANO CARBONS,**
XI'AN, CHINA 22. – 26.5.2016

**QUANTUM STRUCTURE INFRARED
PHOTODETECTORS (QSIP),**
TEL AVIV, 12. – 17.06.2016

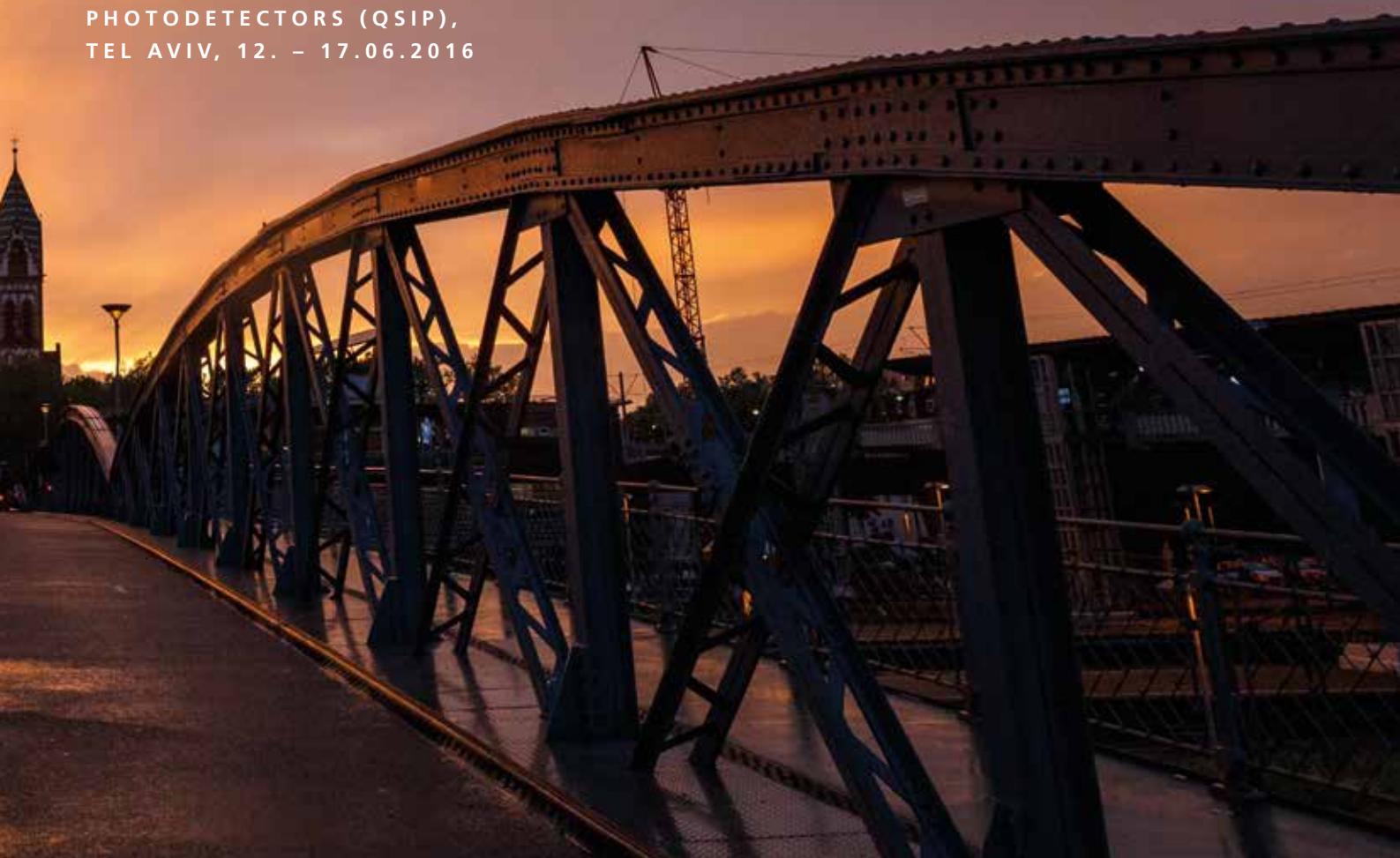
**INTERNATIONAL CONFERENCE ON
DIAMOND AND CARBON MATERIALS,**
MONTPELLIER, FRANCE,
04. – 08.09.2016

FUTURE SECURITY,
BERLIN, 13. – 14.09.2016

SECURITY ESSEN,
ESSEN, GERMANY, 27. – 30.09.2016

EUROPEAN MICROWAVE WEEK
LONDON, 03. – 07.10.2016

SEMICON EUROPE,
GRENOBLE, FRANCE, 25. – 27.10.2016



**FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR
ANGEWANDTE FESTKÖRPERPHYSIK IAF**

**Tullastrasse 72
79108 Freiburg
Germany
Phone +49 761 5159-0
info@iaf.fraunhofer.de
www.iaf.fraunhofer.de**

**Director
Prof. Dr. rer. nat. Oliver Ambacher**

The Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics IAF develops electronic and optoelectronic devices on the basis of compound semiconductors. The institute ranks among the leading research facilities worldwide in the area of III-V semiconductors. Our technologies are used in a variety of branches such as security, energy, communication, health, and mobility.

Das Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF entwickelt elektronische und optoelektronische Bauelemente auf Basis von Verbindungshalbleitern. Das Institut zählt zu den führenden Forschungseinrichtungen weltweit auf dem Gebiet der III/V-Halbleiter. Unsere Technologien werden in unterschiedlichen Bereichen wie Sicherheit, Energie, Kommunikation, Gesundheit und Mobilität eingesetzt.